

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA**

**Análise da sensibilidade do coeficiente de uniformidade de Christiansen ao entupimento de aspersores em pivô central**

Matheus Brito Oliveira da Silva  
*Magister Scientiae*

**VIÇOSA - MINAS GERAIS  
2026**

**MATHEUS BRITO OLIVEIRA DA SILVA**

**Análise da sensibilidade do coeficiente de uniformidade de Christiansen ao entupimento de aspersores em pivô central**

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: Fernando F. da Cunha  
Catariny C. Aleman Pina  
Paulo Roberto Cecon  
Job T. de Oliveira

**VIÇOSA - MINAS GERAIS  
2026**

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

T

S586a  
2026  
Silva, Matheus Brito Oliveira da, 1994-  
Análise da sensibilidade do coeficiente de uniformidade de  
Christiansen ao entupimento de aspersores em pivô central /  
Matheus Brito Oliveira da Silva. – Viçosa, MG, 2026.  
1 dissertação eletrônica (140 f.): il. (algumas color.).

Inclui apêndices.

Orientador: Rubens Alves de Oliveira.

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

Referências bibliográficas: f. 129-135.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2026.292>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Milho - Irrigação. 2. Irrigação - Eficiência. 3. Irrigação  
por aspersores. 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. 633.1587

**MATHEUS BRITO OLIVEIRA DA SILVA**

**Análise da sensibilidade do coeficiente de uniformidade de Christiansen ao entupimento de aspersores em pivô central**

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 2026.

Assentimento:

---

Matheus Brito Oliveira da Silva  
Autor

---

Rubens Alves de Oliveira  
Orientador

Essa dissertação foi assinada digitalmente pelo autor em 08/06/2026 às 15:18:36 e pelo orientador em 10/06/2026 às 15:38:22. 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 **9I4P.HSHV.EXUT** e clique no botão 'Validar documento'.

Seja de Viçosa, do Rio, do mundo ou do universo  
Dedico este trabalho neste verso  
Para todos aqueles que, da sua maneira, contribuíram na minha jornada.  
Afinal, nenhuma conquista é solitária!

Vivo a UFV em um momento relicário  
Que honra tenho de defender no centenário!

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por conceder saúde, paz, amor e sabedoria nessa etapa da minha jornada.

Agradeço aos meus pais, Josy e Roberto, pelo apoio incondicional e pela imensa felicidade em minha vinda para Viçosa. E também ao Kon!

Agradeço ao meu grande amor, Kim, por todo o amor e paciência que me oferece.

Agradeço aos meus sogros, Maria Regina e Nicomedio, pelo suporte de sempre.

Agradeço a todos os meus familiares, em especial, ao caçulinha, o Antônio!

Agradeço a todos os meus amigos ao longo da vida, em especial à Thais, que me apresentou às ciências agrárias, ao empreendedorismo social e à extensão rural.

Agradeço ao professor Rubens Alves de Oliveira por toda a paciência, amizade e companheirismo paternal na orientação. Obrigado por lembrar-me sobre do nobre dever de amarmos todas as coisas que Deus fez.

Agradeço aos coorientadores Fernando, Catariny, Cecon e Job por toda paciência, conselhos e pelo suporte quando necessário. Em conjunto, ao professor Rodrigo Lima, por fornecer a infraestrutura da UEPE Coimbra; e ao professor Michel, pelo sobrevoo de drone.

Agradeço à UFV, ao departamento, ao programa e, principalmente, aos técnicos José Antônio, Policarpo, Carlinhos, Bastião e todos os demais da UEPE Coimbra pelo suporte.

Agradeço ao Allyfe Martins, amigo de jornada, pela incansável parceria.

Agradeço, em especial, a Sophia e o Arthur. Foram os mais fiéis voluntários. Dentre eles, agradeço também ao Dionísio, Daiara, Guilherme, Charles, Pedro, Luana, Karolaine, Amilton e todos aqueles que se ofereceram como voluntários.

Agradeço aos amigos da irrigação: Sabrina, Maltoni, Milena, Joeferon e Karla pelos conselhos e momentos especiais. Agradeço aos amigos do CRRH por termos dividido a estrada juntos!

Agradeço a toda a comunidade viçosense que, desde que cheguei, me tratou com imensurável carinho. Viçosa virou lar na minha história!

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

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo investimento em material de consumo.

À Fundação Arthur Bernardes (FUNARBE), pelo investimento em material de consumo.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES),

pela concessão da bolsa de estudos.

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

A extensão dos agradecimentos é prova que, ainda que tendencie, a pós-graduação não necessita ser uma jornada solitária! Quando estamos juntos, podemos ir mais longe!

Ninguém vence sozinho!

Amor Fati!

“...Olho as florestas murmurando ao vento  
E, ao ver que Tu plantaste cada pé  
Recordo a cruz, o lenho tão cruento  
E no Teu filho afirmo minha fé...”  
Hino 526 – Grandioso és Tu – Harpa Cristã

## RESUMO

SILVA, Matheus Brito Oliveira da, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2026. **Análise da sensibilidade do coeficiente de uniformidade de Christiansen ao entupimento de aspersores em pivô central.** Orientador: Rubens Alves de Oliveira. Coorientadores: Fernando Franca da Cunha, Catariny Cabral Aleman Pina, Paulo Roberto Cecon e Job Teixeira de Oliveira.

O Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC) é utilizado para avaliar a uniformidade de aplicação de água em sistemas de irrigação. Em pivôs centrais com ocorrência de entupimentos, valores elevados de CUC podem mascarar irregularidades na distribuição da lâmina, impactando na produtividade e no uso dos recursos hídricos. Diante da falta de evidências que investiguem a resposta do CUC na criticidade dos entupimentos em emissores, o trabalho analisou a sensibilidade do CUC a diferentes cenários combinatórios de entupimento, considerando o número de emissores entupidos e a disposição espacial. Foram realizados ensaios de uniformidade com e sem entupimentos (individuais e coletivos), a partir da seleção de 12 emissores, entre 36, distribuídos sob equidistância. Com base nos volumes obtidos em campo, aplicou-se modelagem computacional para simular 4.096 cenários de entupimento. Considerou-se o vento como fator de influência na uniformidade. Estimativas de produtividade do milho foram realizadas para o município de Coimbra–MG, relacionando a perda de uniformidade a possíveis impactos agrônômicos e subsidiando previsões de manutenção. O CUC mostrou-se mais sensível à disposição espacial dos entupimentos do que à quantidade de emissores entupidos, constatando equivalências de uniformidade entre cenários com diferentes níveis de entupimento. O CUC foi mais influenciado pelo sentido do vento, em função do posicionamento geográfico do sistema, do que pela sua velocidade. Emissores próximos à torre móvel apresentaram maior criticidade, contribuindo para a redução do CUC e para perdas de produtividade, em razão de limitações de sobreposição. Quanto às classificações operacionais, a proposta de Mantovani (2001) subestimou cenários críticos de entupimentos, enquanto a classificação da ABNT (2016) mostrou-se mais adequada para categorizar o impacto do entupimento. Conclui-se que a distribuição espacial dos entupimentos é o fator de maior influência sobre a variabilidade das lâminas aplicadas e, conseqüentemente, sobre a sensibilidade do CUC em pivôs centrais.

Palavras-chave: eficiência de distribuição; irrigação; irrigação por aspersão; milho

## ABSTRACT

SILVA, Matheus Brito Oliveira da, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2026. **Analysis of the sensitivity of the Christiansen uniformity coefficient to sprinkler clogging in center pivot systems.** Adviser: Rubens Alves de Oliveira. Co-advisers: Fernando Franca da Cunha, Catariny Cabral Aleman Pina, Paulo Roberto Cecon and Job Teixeira de Oliveira.

The Christiansen Uniformity Coefficient (CUC) is widely used to assess water application uniformity in irrigation systems. However, in center pivots with clogging occurrences, high CUC values may mask relevant irregularities in water depth distribution, impacting productivity and efficient water use. Given the lack of evidence investigating CUC response to clogging criticality in emitters, this study analyzed CUC sensitivity to different combinatorial scenarios of sprinkler clogging in center pivots, considering both the number of clogged emitters and their spatial arrangement. Uniformity tests were conducted under unclogged and under individual and collective clogging scenarios, based on the selection of 12 emitters out of 36, distributed equidistantly along the lateral. Using volumetric data from field experiments, computational modeling simulated 4,096 clogging scenarios. Additionally, wind effects were considered as an influencing factor on uniformity, and maize yield was estimated for Coimbra, Minas Gerais State, Brazil, allowing the relationship between uniformity losses and agronomic impacts to be assessed and supporting a predictive maintenance framework. Results indicated that the CUC is more sensitive to the spatial distribution of clogging than to the total number of clogged emitters, with equivalent uniformity values observed among scenarios with different clogging levels. The CUC was also more influenced by wind direction, due to the geographic positioning of the system, than by wind speed. Emitters near the mobile tower were identified as more critical, contributing simultaneously to CUC reduction and yield losses due to limited overlap. Regarding operational classifications, the proposal by Mantovani (2001) tended to underestimate critical scenarios with multiple clogging events, whereas the ABNT (2016) classification proved more suitable for categorizing the impact of emitter clogging. We conclude that the spatial distribution of clogged emitters is the main factor influencing applied depth variability and, consequently, CUC sensitivity in center pivot irrigation systems.

Keywords: distribution efficiency; irrigation ; sprinkler irrigation; maize yield

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Modelo digital de elevação e curvas de nível da área de estudo .....	33
Figura 2 – Identificação dos emissores analisados e obstruídos no teste de diâmetro molhado .....	36
Figura 3 – Posicionamento das linhas de coletores A e B .....	37
Figura 4 – Pontos de início e final de teste .....	38
Figura 5 – Conjunto de vedação para simular entupimento .....	44
Figura 6 – Ilustração das áreas molhadas para os volumes de referência .....	47
Figura 7 – Ilustração das áreas molhadas e da relação matemática no entupimento do emissor 3.....	48
Figura 8 – Ilustração das áreas molhadas e da relação matemática no entupimento do emissor 6.....	49
Figura 9 – Ilustração das áreas molhadas e da relação matemática no entupimento do emissor 9.....	50
Figura 10 – Ilustração das áreas molhadas em interseção .....	51
Figura 11 – Relação de equações para cada área.....	52
Figura 12 – Número de cenários por grupos de emissores entupidos .....	55
Figura 13 – Faixas radiais do sistema e seus respectivos emissores.....	57
Figura 14 – Disposição da área de influência (em verde), da faixa molhada (em vermelho) e traçado do rodado (azul) .....	59
Figura 15 – Diagrama de dispersão entre vazões nominais e amostrais .....	67
Figura 16 – Variações do CUC (%) com e sem correção de evaporação segundo ABNT (2016) .....	71
Figura 17 – Boxplot com variação do CUC por sentido cardinal do vento .....	73
Figura 18 – Boxplot de distribuição da velocidade em função do sentido do vento ..	74
Figura 19 – CUC (%) em cenários de entupimento individual e duplo .....	76
Figura 20 – Agrupamentos combinatórios em trios e CUC (%) médio .....	78
Figura 21 – Relação de agrupamentos combinatórios em quartetos e CUC (%) médio .....	81
Figura 22 – Relação de agrupamentos combinatórios em quintetos e CUC (%) médio .....	83
Figura 23 – Relação de agrupamentos combinatórios em sextetos e CUC (%) médio .....	86

Figura 24 – Relação de agrupamentos combinatórios em septetos e CUC (%) médio .....	89
Figura 25 – Relação de agrupamentos combinatórios em octetos e CUC (%) médio .....	92
Figura 26 – Relação de agrupamentos combinatórios em nonetos e CUC (%) médio .....	95
Figura 27 – Relação de agrupamentos combinatórios em decatetos e CUC (%) médio .....	98
Figura 28 – Relação de agrupamentos combinatórios em hendecatetos e CUC (%) médio .....	101
Figura 29 – Variação do CUC Médio (sem reposição volumétrica) com a quantidade de emissores entupidos (x) em modelo de potência negativa com classificação por Mantovani (2001) .....	108
Figura 30 – Variação do CUC Médio (sem reposição volumétrica) com a quantidade de emissores entupidos (x) em modelo de potência negativa com classificação por ABNT (2016) .....	110
Figura 31 – Variação do CUC Médio (com reposição volumétrica) e a quantidade de emissores entupidos (x) em modelo de potência negativa com classificação de Mantovani (2001) .....	112
Figura 32 – Variação do CUC Médio (com reposição volumétrica) e a quantidade de emissores entupidos (x) em modelo de potência negativa com classificação por ABNT (2016) .....	114
Figura 33 – Relação entre uniformidade, perdas e quantidade de emissores entupidos por cenário .....	118
Figura 34 – Distribuição das perdas em função do número de emissores entupidos .....	120
Figura 35 – Perda média por emissor considerando todos os cenários de entupimento.....	121
Figura 36 – Perfil radial de lâmina para cenário de referência (sem entupimento) .	122
Figura 37 – Perfil radial de lâmina para o pior cenário (12 entupimentos) .....	122
Figura 38 – Uniformidade Média para todos os cenários por presença do emissor	124

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação do Coeficiente de Uniformidade de Christiansen proposta por Mantovani (2001) .....	42
Tabela 2 – Classificação do Coeficiente de Uniformidade de Christiansen proposta pela ABNT (2016).....	42
Tabela 3 – Número de ordem dos coletores impactados por emissor para as linhas A e B.....	45
Tabela 4 – Cotação do milho entre 28/10/2025 e 10/11/2025.....	60
Tabela 5 – Mapeamento de bocais com razão percentual e erro relativo entre vazões nominais e amostrais (Senninger UP3).....	65
Tabela 6 – Leituras de pressão e perda de carga média no pivô.....	67
Tabela 7 – Altura e diâmetro molhado dos emissores experimentais .....	68
Tabela 8 – Dados meteorológicos durante os testes de avaliação da uniformidade de aplicação de água .....	69
Tabela 9 – CUC observado e CUC corrigido por evaporação (ABNT, 2016).....	70
Tabela 10 – Registros de velocidade e sentido vento durante os testes.....	72
Tabela 11 – Frequência de grupos de emissores por FR, em função das classificações de uniformidade (Mantovani, 2001; ABNT, 2016), para entupimentos em trios .....	79
Tabela 12 – Frequência de grupos de emissores por FR, em função das classificações de uniformidade (Mantovani, 2001; ABNT, 2016), para entupimentos em quartetos .....	82
Tabela 13 – Frequência de grupos de emissores por FR, em função das classificações de uniformidade (Mantovani, 2001; ABNT, 2016), para entupimentos em quintetos.....	85
Tabela 14 – Frequência de grupos de emissores por FR, em função das classificações de uniformidade (Mantovani, 2001; ABNT, 2016), para entupimentos em sextetos .....	87
Tabela 15 – Frequência de grupos de emissores por FR, em função das classificações de uniformidade (Mantovani, 2001; ABNT, 2016), para entupimentos em septetos.....	90

Tabela 16 – Frequência de grupos de emissores por FR, em função das classificações de uniformidade (Mantovani, 2001; ABNT, 2016), para entupimentos em octetos.....	93
Tabela 17 – Frequência de grupos de emissores por FR, em função das classificações de uniformidade (Mantovani, 2001; ABNT, 2016), para entupimentos em nonetos.....	96
Tabela 18 – Frequência dos grupos de emissores por FR, em função das classificações de uniformidade (Mantovani, 2001; ABNT, 2016), nos entupimentos em decatetos.....	99
Tabela 19 – Frequência dos grupos de emissores por FR, em função das classificações de uniformidade (Mantovani, 2001; ABNT, 2016), nos entupimentos em hendecatetos.....	102
Tabela 20 – Combinações de FRs imediatamente acima de 60% no CUC .....	103
Tabela 21 – Quantificação dos emissores por FR em combinações acima de 60% .....	104
Tabela 22 – Combinações de FRs imediatamente acima de 70% no CUC. ....	105
Tabela 23 – Quantificação dos emissores por FR em combinações acima de 70% .....	105
Tabela 24 – Combinações de FRs imediatamente acima de 80% no CUC .....	106
Tabela 25 – Quantificação dos emissores por FR em combinações acima de 80% .....	107
Tabela 26 – Relação entre os subgrupos pela quantidade de emissores entupidos e as médias de uniformidade sem consideração da evaporação.....	107
Tabela 27 – Relação entre os subgrupos pela quantidade de emissores entupidos e as médias de uniformidade considerando a evaporação pela ABNT NBR ISO 11545:2016 .....	111
Tabela 28 – Dados predecessores para análise do impacto de entupimento na produtividade do milho para o município de Coimbra-MG .....	116
Tabela 29 – Dados de entrada para cálculo da produtividade por um único emissor .....	117
Tabela 30 – Relação das massas produzidas e prejuízos para os cenários de entupimento de um único emissor.....	117
Tabela 31 – Estimativa da média, desvio padrão e erro padrão da média das perdas médias dos respectivos emissores.....	123

Tabela 32 – Estimativa da média, desvio padrão e erro padrão da média das uniformidades médias dos respectivos emissores .....	125
Tabela 33 – Avaliação de prioridade preventiva para o pivô central de Coimbra-MG .....	126
Tabela 34 – Volumes coletados e as respectivas médias por coletor para testes sem entupimento de emissores .....	136

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas.
B3	Brasil, Bolsa, Balcão.
BOVESPA	Bolsa de Valores de São Paulo.
CAD	Computer-Aided Design.
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior.
CEPEA	Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada.
CONAB	Companhia Nacional do Abastecimento.
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico.
CUC	Coeficiente de Uniformidade de Christiansen.
FR	Faixa Radial
FRs	Faixas Radiais
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária.
ESALQ	Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”.
FAO	Food and Agriculture Organization.
FUNARBE	Fundação Arthur Bernardes.
GPS	Geographic Positioning System.
GIS	Geographic Information System.
IDE	Integrated Development Environment.
UEPE	Unidade de Ensino Pesquisa e Extensão.
UFV	Universidade Federal de Viçosa.
USP	Universidade de São Paulo.
VBA	Visual Basic for Applications.

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	18
2. REVISÃO DE LITERATURA .....	22
2.1 Irrigação por pivô central.....	22
2.2 Uniformidade de distribuição de água.....	24
2.3 Entupimento de emissores.....	26
2.4 Uniformidade e produtividade agrícola.....	28
2.5 Cultura do milho .....	28
2.6 Modelos de predição na cultura do milho.....	30
3. MATERIAL E MÉTODOS .....	32
3.1 Etapas de validação .....	33
3.1.1 Teste de vazão .....	34
3.1.2 Teste de pressão .....	35
3.1.3 Teste de diâmetro molhado .....	35
3.1.4 Teste de uniformidade .....	36
3.1.5 Vento e evaporação.....	39
3.2 Testes para avaliação do Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC) e adaptação para pivôs centrais por Heermann e Hein (1968).....	40
3.3 Condições de vazão e uniformidade do sistema.....	42
3.4 Simulações combinatórias de cenários.....	44
3.4.1 Encadeamento de volumes para construção de cenários .....	46
3.4.2 Calculadora do CUC para os cenários e análise estatística .....	53
3.4.3 Análise do CUC dos cenários gerados .....	54
3.4.4 Produtividade do milho .....	57
3.4.4.1 Avaliação dos cenários de entupimento na produtividade.....	62
3.4.4.2 Avaliação individual dos emissores na produtividade do milho .....	63
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	65
4.1 Vazões .....	65
4.2 Pressões .....	67
4.3 Diâmetro molhado.....	68
4.4 Condições meteorológicas.....	69
4.5 Teste de uniformidade conforme ABNT .....	69
4.6 Relação vento e CUC .....	71
4.7. Simulações.....	75

4.7.1	Influência das FRs na uniformidade sob entupimento .....	77
4.7.1.1	Trios entupidos .....	77
4.7.1.2	Quartetos entupidos .....	79
4.7.1.3	Quintetos entupidos.....	82
4.7.1.4	Sextetos entupidos .....	85
4.7.1.5	Septetos entupidos .....	87
4.7.1.6	Octetos entupidos.....	90
4.7.1.7	Nonetos entupidos.....	93
4.7.1.8	Decatetos entupidos .....	96
4.7.1.9	Hendecatetos entupidos .....	100
4.7.1.10	Cenário único com dodecateto entupido .....	102
4.7.2	Combinações com equivalências no CUC.....	103
4.7.2.1	Combinações de FRs imediatamente acima de 60% no CUC .....	103
4.7.2.2	Combinações de FRs imediatamente acima de 70% no CUC .....	104
4.7.2.3	Combinações de FRs imediatamente acima de 80% no CUC .....	106
4.7.3	Efeito do CUC em função da quantidade de emissores entupidos.....	107
4.7.4	Avaliação do modelo sem reposição volumétrica para a classificação de Mantovani (2001).....	108
4.7.5	Avaliação do modelo sem reposição volumétrica para a classificação ABNT (2016).....	109
4.7.6	Modelagem dos dados com reposição da evaporação.....	111
4.7.7	Avaliação do modelo com reposição volumétrica para a classificação de Mantovani (2001).....	112
4.7.8	Avaliação do modelo com reposição volumétrica para a classificação da ABNT (2016).....	113
4.8.	Análise estatística comparativa entre os dados coletados em campo e as simulações .....	115
4.8.1	Comparação entre os dados de uniformidade sem reposição volumétrica .....	115
4.8.2	Comparação entre os dados de uniformidade com reposição volumétrica .....	115
4.8.3	Comparação entre os dados de uniformidade para múltiplos entupimentos .....	115
4.9.	Produtividade do milho.....	116
4.9.1	CUC e as perdas de produtividade em cenários de entupimento.....	116
4.9.2	Milho: distribuição de perda por quantidade de emissores entupidos..	119
4.9.3	Milho: impacto na produtividade - perda média por emissor.....	120
4.9.4	Milho: impacto na produtividade - uniformidade média por emissor ....	124

4.9.5 Normalização para ponderações e score final.....	125
4.9.6 Comparativo entre as ponderações e análise da variabilidade.....	126
5. CONCLUSÕES .....	128
REFERÊNCIAS.....	129
APÊNDICE A - Notas .....	136
APÊNDICE B - Notas .....	140

## 1. INTRODUÇÃO

A irrigação constitui um dos pilares tecnológicos em consolidação para a expansão da produtividade agrícola, desempenhando papel estratégico no desenvolvimento do agronegócio global, sobretudo em regiões áridas e semiáridas, onde contribui para mitigar os efeitos de baixos índices pluviométricos (WANG et al., 2021; WU et al., 2022; TIAN et al., 2025). Além de seu impacto direto na produção de alimentos, a irrigação exerce influência econômica relevante no cenário geopolítico e é fundamental para assegurar a segurança alimentar e nutricional da sociedade contemporânea.

Entretanto, a intensificação produtiva impõe um desafio operacional e ambiental central: como ampliar o uso eficiente da água sem comprometer sua disponibilidade e qualidade para as gerações futuras? Nesse contexto, os sistemas de irrigação por pivô central apresentam-se como alternativas consolidadas. Embora demandem elevados volumes de água devido à sua aplicação em grandes áreas, esses sistemas se destacam pela elevada capacidade de automação e pela redução da necessidade de mão de obra (ABD EL-WAHED; SWELAN, 2012; BERNARDO et al., 2019).

A irrigação por pivô central figura entre as tecnologias de precisão mais difundidas para enfrentar esse dilema. Países como Brasil, Estados Unidos, Canadá, Zâmbia e África do Sul concentram extensas áreas irrigadas por esse sistema. A estimativa global de aproximadamente 11,5 milhões de hectares irrigados por pivôs centrais (TIAN et al., 2025) evidencia sua adoção na agricultura, principalmente em grandes extensões agrícolas.

No cenário brasileiro, a irrigação por pivô central ocupa posição de destaque na agricultura irrigada. Segundo Guimarães e Landau (2020), o Brasil possui mais de 1,6 milhão de hectares irrigados por esse sistema, sendo o principal método de irrigação por aspersão no país. Nos últimos anos, o país aproximou-se dos 2 milhões de hectares irrigados (ANA, 2022).

O bioma Cerrado é a principal região de concentração de pivôs centrais no Brasil, abrigando aproximadamente 80% das unidades instaladas no país. Apesar disso, o Brasil ainda não atingiu sequer metade do potencial estimado de área irrigável nessa região, indicando um desenvolvimento ainda lento da agricultura irrigada, embora existam tendências de expansão. Projeções indicam a possibilidade de

alcançar até 6 milhões de hectares irrigados por pivôs centrais até a década de 2090 (ALTHOFF; RODRIGUES, 2019).

Embora apresente expressiva expansão global, a velocidade de disseminação da irrigação por pivô central varia entre as regiões, sendo condicionada por fatores operacionais, econômicos e de eficiência hidráulica. Ademais, a confiabilidade e a longevidade desses sistemas são continuamente ameaçadas por um fenômeno silencioso e cumulativo: o entupimento dos emissores.

O entupimento dos emissores compromete diretamente a uniformidade de distribuição de água e, conseqüentemente, a produtividade das culturas, ao provocar estresse por déficit hídrico em diferentes regiões da área irrigada, em função do desbalanceamento das lâminas aplicadas (LI, 1998). Esse efeito se agrava pelo fato de que o impacto do entupimento não ocorre de forma homogênea ao longo da linha lateral do equipamento, tornando-se mais pronunciado à medida que aumenta a distância entre o emissor obstruído e a torre central do pivô. Sob o ponto de vista hidráulico, o desbalanceamento das lâminas em cenários de entupimento decorre de anomalias nas vazões em marcha, associadas às tentativas do sistema de compensar a deficiência de aplicação em emissores obstruídos por meio da redistribuição das vazões ao longo da linha lateral (MEDRADO DA SILVA; AZEVEDO, 1998).

A uniformidade de distribuição de água em sistemas de irrigação é tradicionalmente avaliada por meio do Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC), método clássico proposto por Christiansen (1942). Para sistemas de pivô central, contudo, o cálculo do CUC foi adaptado para ponderar as diferentes áreas de influência dos emissores ao longo do raio do equipamento (HEERMANN; HEIN, 1968). Ressalta-se que outros fatores também influenciam negativamente a uniformidade de distribuição, como a velocidade do vento, o espaçamento entre aspersores (JENSEN, 2007; MANTOVANI et al., 2012), o diâmetro dos bocais e a pressão de operação do sistema (SILVEIRA; STONE, 2004).

Considerando que os projetos de irrigação por pivô central demandam elevados investimentos na fase de implantação, a redução da uniformidade de distribuição representa riscos diretos ao potencial produtivo e à rentabilidade das culturas irrigadas. Nesse contexto, modelos matemáticos, como regressões estatísticas, mostram-se ferramentas adequadas para representar o relacionamento entre a uniformidade de distribuição e as anomalias associadas à variação das vazões

dos emissores em cenários de entupimento, permitindo a compreensão do relacionamento entre os fatores e a dependência de variáveis (CHEIN, 2019).

Entre as culturas de maior relevância para o agronegócio brasileiro, destaca-se o milho (*Zea mays* L.), segundo grão mais cultivado no país, com expressiva participação tanto no mercado interno quanto na cadeia da pecuária, como insumo para a produção de rações animais (SOUZA et al., 2018). Essa relevância estende-se ao cenário global, uma vez que o milho constitui uma das culturas agrícolas mais importantes do mundo (CAMILO et al., 2018). No Brasil, a produção alcançou aproximadamente 132 milhões de toneladas em 2023, posicionando o país como o terceiro maior produtor mundial, atrás apenas da China e dos Estados Unidos (FAOSTAT, 2025).

A combinação entre o elevado potencial de expansão da irrigação por pivô central (GUIMARÃES; LANDAU, 2020) e a importância estratégica da cultura do milho reforça a necessidade de análises minuciosas que relacionem o desempenho hidráulico dos sistemas de irrigação à produtividade agrícola. Contudo, a expansão dessa modalidade de irrigação por aspersão exige aprofundamento das discussões sobre as condições hidráulicas de operação dos sistemas e suas implicações para a produtividade das culturas

A compreensão dos efeitos do entupimento dos emissores e a avaliação da operacionalidade dos sistemas de irrigação constituem estratégias fundamentais tanto sob a perspectiva econômica (ao favorecer a expansão da capacidade produtiva) quanto sob a ótica ambiental, ao contribuir para a mitigação do desperdício de recursos hídricos, um dos princípios basilares da agricultura de precisão.

A justificativa desta análise fundamenta-se na percepção de impactos potencialmente relevantes decorrentes das anomalias associadas à variabilidade das lâminas aplicadas e à produtividade das culturas.

O estudo proposto evidencia a importância, sob os aspectos técnico e econômico, de uma análise minuciosa que relacione a elevada variabilidade das lâminas aplicadas pelos emissores às anomalias hidráulicas, mesmo em situações em que a uniformidade de distribuição apresenta valores considerados aceitáveis em testes de campo realizados em pivôs centrais. Tal abordagem suscita reflexões críticas quanto à sensibilidade do coeficiente de uniformidade na detecção de falhas operacionais relevantes.

Apesar dos avanços na compreensão dos efeitos do entupimento na uniformidade de distribuição e as ponderações por área de cada emissor, persistem lacunas relevantes na literatura. Faltam evidências sobre como o CUC responde a diferentes combinações espaciais de entupimento, sob perspectiva da quantidade e da disposição. Adicionalmente, as normativas para os testes de uniformidade consideram reposições volumétricas estimadas em virtude da evaporação ao longo do procedimento, acarretando no aumento percentual do coeficiente de uniformidade. Tal ocorrência levanta a hipótese do coeficiente de uniformidade não manter sua sensibilidade diagnóstica quando aplicado com correção de dados de evaporação. Embora existam estudos que relacionem a uniformidade pela produtividade, há carência de modelos preditivos que integrem entupimento e impactos econômicos na produtividade das culturas, limitando a capacidade dos irrigantes de realizar manutenção preventiva baseada em risco.

Dessa forma, os objetivos na realização das atividades consistiram em: (i) investigar a sensibilidade do Coeficiente de Uniformidade de Christiansen frente a problemas de entupimento (obstrução total) combinado de emissores em sistemas de irrigação por pivô central; (ii) comparar o Coeficiente de Uniformidade de Christiansen dos cenários de entupimento com as classificações categorizadas de Mantovani (2001) e da ABNT (2016); (iii) analisar a influência do vento nos valores do Coeficiente de Uniformidade de Christiansen para o pivô central do estudo; (iv) avaliar os efeitos do entupimento sobre o valor da produção da cultura do milho irrigado por pivô central, estabelecendo panorama preditivo de investigação e manutenção dos emissores. O conjunto dos objetivos contribui na quantificação da sensibilidade do CUC aos entupimentos, permitindo mensurar os graus de severidade das classificações estabelecidas por normativas vigentes em uniformidade de irrigação.

## 2. REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 Irrigação por pivô central

A irrigação por aspersão é um método em que a água é pressurizada e aplicada em pequenas gotas no ar, imitando a chuva natural (CHAUHDARY et al., 2024). Existem vários sistemas de irrigação por aspersão que podem ser utilizados de acordo com as características do solo, da cultura, da área irrigada e da disponibilidade de recursos hídricos, energéticos e econômicos. Dentre eles, destaca-se o sistema de irrigação por pivô central, que irriga áreas circulares. O pivô central caracteriza-se por uma estrutura metálica ancorada em um ponto fixo central, a partir do qual se estende uma linha lateral sustentada por torres móveis providas de rodas. Ao longo dessa linha encontram-se os aspersores que, ao girarem em torno do ponto central, promovem a irrigação contínua de uma área circular.

Desenvolvido no estado norte-americano do Colorado em 1952, o sistema de pivô central passou a ganhar relevância entre as décadas de 1960 e 1970, alcançando, em meados da década de 1970, aproximadamente 1 milhão de hectares irrigados apenas nos Estados Unidos (BERNARDO et al., 2019), com destaque para os estados do Colorado e de Nebraska. Atualmente, trata-se de uma tecnologia amplamente difundida em escala global, com presença marcante em países como a China e o Brasil, além de regiões historicamente agrícolas, como as proximidades do delta do Rio Nilo, onde vem sendo utilizada desde a década de 1980 (MOHAMMED et al., 2023) e desempenha papel fundamental na segurança alimentar do Egito.

No Brasil, a irrigação por pivô central tem expressiva representatividade. De acordo com o Boletim 222 da Embrapa (2020), o país possuía mais de 1,6 milhão de hectares irrigados por esse sistema. No ano de 2022, os pivôs centrais irrigaram 1,9 milhões de hectares em território brasileiro (ANA, 2022), consolidando-se como o método dominante na modalidade de irrigação por aspersão sob perspectiva da área irrigada. Essa predominância está associada às elevadas possibilidades de automação (ABD EL-WAHED; SWELAM, 2012), à redução da necessidade de mão de obra (DECHMI; PLAYÁN; FACI, et al., 2003) e ao elevado potencial produtivo proporcionado pelo sistema (BERNARDO et. al. 2019). Como consequência, a irrigação por pivô central desempenha papel estratégico na produção agrícola nacional, como a de feijão, cenoura e milho.

Os pivôs centrais apresentam características operacionais voltadas à irrigação de grandes áreas. Em termos gerais, são capazes de irrigar áreas próximas a 100 hectares. Segundo Bernardo et. al. (2019), sob a perspectiva comercial, os modelos mais difundidos possuem raios entre 400 e 600 metros, irrigando áreas de 60 a 80 hectares.

Entretanto, a irrigação de grandes extensões impõe desafios operacionais significativos. A disponibilidade hídrica e a eficiência no uso da água configuram-se como aspectos críticos para a sustentabilidade dos sistemas de pivô central. No Brasil, observa-se a intensificação de disputas pelo uso da água em decorrência da rápida expansão da agricultura irrigada. Esse cenário é agravado pelo fato de muitos sistemas estarem localizados em bacias hidrográficas com baixa disponibilidade hídrica ou com carência de informações técnicas consolidadas sobre as vazões disponíveis (SANO et al., 2024). Ainda assim, o avanço da agricultura irrigada em larga escala em regiões áridas e semiáridas constitui uma tendência global, resultando em um crescimento expressivo na adoção de pivôs centrais neste século (CHEN et al., 2023).

A elevada demanda por recursos hídricos exige um ajuste cada vez mais preciso na gestão da água disponível, destacando a importância de manter a uniformidade de distribuição ao longo do sistema. Baixos níveis de uniformidade comprometem o atendimento à demanda de evapotranspiração das culturas e podem tornar a irrigação ineficaz e ineficiente no combate ao estresse hídrico (HOWES et al., 2015).

O sistema pivô central é composto, no trajeto entre a fonte hídrica e a cultura irrigada, por tubulação de sucção, conjunto motobomba, tubulação de recalque, torre central e tubulação da linha lateral segmentada em vãos, apoiada sobre torres móveis e sustentada por treliças. (MORENO et al., 2012).

Os primeiros modelos de pivô central utilizavam aspersores de impacto instalados na parte superior da linha lateral, operando sob a pressão total do sistema. Esses emissores eram capazes de irrigar grandes diâmetros molhados (HANSON; ORLOFF, 1996). Embora apresentassem bons níveis de uniformidade, esses sistemas sofriam perdas expressivas de água devido à ação do vento e às elevadas pressões de operação.

A mitigação dos problemas de deriva foi alcançada por meio da redução da altura de instalação e da pressão de operação dos aspersores, o que aumentou o

tamanho das gotas e reduziu o percurso da água entre o emissor e o solo. Nesse contexto, foram desenvolvidas mangueiras de derivação, posicionando os aspersores entre 3 e 8 pés (1,0 e 2,6 metros respectivamente) acima do solo, conforme o projeto, além de emissores equipados com bocais que direcionam o jato verticalmente contra placas defletoras lisas ou estriadas, produzindo jato único ou múltiplos jatos. Esse arranjo deu origem aos aspersores do tipo difusor, cuja principal vantagem reside na operação sob baixas pressões, associada ao uso de reguladores de pressão na faixa de 10 a 20 *psi* (68,95 *kPa* e 137,90 *kPa* respectivamente), que conectam a mangueira de derivação ao emissor (HANSON; ORLOFF, 1996).

Avanços adicionais foram promovidos pelo setor de pesquisa e desenvolvimento da Nelson Irrigation Company®, com a introdução de defletores rotativos. O modelo denominado *Rotator* utiliza a força hidrodinâmica do escoamento para promover a rotação do defletor (HANSON; ORLOFF, 1996), otimizando a dispersão das gotas e melhorando a distribuição da água ao longo do diâmetro molhado, o que resulta em incrementos na uniformidade de aplicação (PLAYÁN et al., 2004).

## **2.2 Uniformidade de distribuição de água**

A uniformidade de irrigação é o parâmetro utilizado para mensurar a variabilidade das lâminas aplicadas ao longo da área irrigada. Do ponto de vista agrônomo, o cenário ideal corresponde à aplicação equitativa de água, favorecendo o crescimento uniforme da cultura e o uso eficiente dos recursos hídricos. A redução da uniformidade impacta diretamente a lâmina total requerida pelo sistema, uma vez que o desbalanceamento das lâminas exige aplicações adicionais para compensar áreas deficitárias (LI, 1998).

A uniformidade de distribuição de água exerce influência direta sobre o desenvolvimento pleno das culturas. El-Wahed et al. (2015) ao avaliarem a relação entre uniformidade e produtividade da cevada, constataram maiores rendimentos de grãos em tratamentos irrigados por aspersão que apresentaram valores mais elevados de uniformidade.

Cabe destacar que nenhum sistema de irrigação é capaz de atingir uniformidade absoluta. Existem limitações inerentes aos princípios hidráulicos e às características construtivas de cada sistema, que resultam em variações de pressão

e de vazão. Além disso, a qualidade da água interfere no desempenho hidráulico, por meio de interações químicas, físicas e biológicas (TAYLOR et al., 1995; OLIVEIRA BATISTA et al., 2006).

Os testes de uniformidade têm como objetivo quantificar as lâminas aplicadas ao longo da área irrigada, por meio da disposição de pluviômetros coletores em posições previamente definidas, garantindo equivalência entre suas áreas de influência. Os dados coletados são posteriormente tratados por meio de equações específicas, permitindo estimar o desempenho hidráulico, identificar variações operacionais e calcular coeficientes que expressam a capacidade do sistema em distribuir água de forma homogênea. No entanto, Green e Pattison (2022) demonstram que configurações espaciais e a densidade disposta dos coletores nas metodologias de amostragem afetam os valores do coeficiente de uniformidade. Em conjunto, parâmetros meteorológicos também devem ser considerados (MAROUFPOOR et al., 2010).

O método mais difundido para avaliar a uniformidade é o Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC), proposto por J. E. Christiansen em 1942 para sistemas de aspersão convencional. Nesse procedimento, os pluviômetros são distribuídos de forma equidistante; o sistema opera por um período predeterminado e, ao final, os volumes coletados são convertidos em lâmina com base na área dos coletores. Christiansen (1942) também discutiu perdas por evaporação e variações de vazão, reconhecendo a existência de fenômenos hidráulicos que comprometem a uniformidade plena.

Com o avanço tecnológico e a consolidação dos pivôs centrais a partir da década de 1950, Heermann e Hein (1968) observaram que o CUC, ao atribuir áreas representativas iguais a todos os coletores, não era adequado para a avaliação desses sistemas. Em pivôs centrais, os coletores dispostos ao longo de linhas radiais representam áreas distintas, o que exige ponderação dos valores em função da distância ao centro do equipamento. Conforme destacado por Bernardo et al. (2019), quanto maior a distância do emissor ao centro do pivô, maior é a área irrigada sob sua responsabilidade, tornando os emissores mais distantes mais relevantes para a uniformidade global do sistema.

A norma ABNT NBR ISO 11545:2016 estabelece que os testes de uniformidade em pivôs centrais sejam realizados com duas linhas radiais espaçadas em 3°, com ordenamento específico dos coletores. A norma também prevê o

posicionamento alternado dos coletores entre as linhas, evitando a coincidência de distâncias ao centro do pivô, e classifica os coeficientes obtidos em faixas de desempenho operacional (ABNT, 2016). Para avaliação da performance operacional, Mantovani (2001) classifica o CUC em cinco categorias: Excelente ( $\geq 90\%$ ), Bom ( $\geq 80\%$ ), Razoável ( $\geq 70\%$ ), Ruim ( $\geq 60\%$ ) e Péssimo ( $< 60\%$ ). A ABNT (2016), por sua vez, adota quatro categorias: Muito boa ( $\geq 90\%$ ), Boa ( $\geq 85\%$ ), Regular ( $\geq 80\%$ ) e Ruim ( $< 80\%$ ).

A normalização dos procedimentos de avaliação e a classificação da uniformidade é pauta em discussões sobre a precisão dos resultados relacionados com a modalidade de irrigação. Mateos (2006) comparou três modalidades de irrigação (aspersão, gotejamento e sulcos) e concluiu os procedimentos de avaliação de uniformidade não funcionam da mesma forma para todas as modalidades, onde os métodos de avaliação, a depender do sistema, podem subestimar ou superestimar a uniformidade.

Enquanto parâmetro da uniformidade, a distribuição também apresenta variações espaciais relacionadas às modalidades dos sistemas de irrigação. Meron et al. (2025) utilizaram ferramentas de sensoriamento remoto para revelar variações espaciais na distribuição de água para cada modalidade, afetando os respectivos CUC.

Os resultados apresentados por Mateos (2006) e Meron et al. (2025) indicam que a classificação da uniformidade poderia representar a distribuição com maior precisão ao trazer, de forma predecessora, considerações da modalidade do sistema de irrigação.

### **2.3 Entupimento de emissores**

O entupimento de aspersores constitui um dos principais fatores de comprometimento da uniformidade de distribuição de água, podendo ter origem física, química ou biológica. O entupimento físico decorre da presença de partículas sólidas suspensas, capazes de se acumular nos bocais e interferir diretamente no escoamento (KELLER; BLIESNER, 1990). A presença de matéria orgânica ou sólidos em suspensão frequentemente indica problemas de qualidade da água ou falhas nos sistemas de vedação, tratamento (filtração) e proteção da sucção, podendo ocasionar não apenas entupimentos, mas também danos ao conjunto motobomba.

O entupimento químico está associado à precipitação de sais e minerais, como carbonatos e óxidos, que são influenciados pelo pH e pela temperatura da água. Esses depósitos podem resultar tanto da qualidade da água captada quanto de aplicação frequente de fertilizantes via fertirrigação. Já o entupimento biológico relaciona-se à proliferação de microrganismos presentes na água, que formam biofilmes e mucilagens no interior de reguladores, emissores e bocais (BUCKS et. al., 1979).

Esses mecanismos podem ocorrer isoladamente ou em combinação (PETIT et al., 2022), promovendo alterações progressivas nas vazões e na uniformidade do sistema. Diante desse cenário, torna-se essencial a adoção de estratégias de mitigação, como manutenções preventivas, com o objetivo de preservar a eficiência operacional.

A posição espacial dos entupimentos influencia diretamente a redistribuição das vazões no sistema e, conseqüentemente, a adequação das lâminas aplicadas. O modelo de simulação proposto por Nakayama e Bucks (1981) demonstrou que baixos percentuais de entupimento podem distorcer a curva de distribuição de vazões. Essa distorção resulta em aplicações desiguais de água, nas quais grupos de emissores obstruídos operam abaixo da demanda, enquanto os emissores livres podem apresentar vazões superiores ao ideal, dependendo das condições hidráulicas do sistema.

A relação entre entupimento e uniformidade está diretamente ligada à variação das lâminas individuais aplicadas pelos emissores. Keller e Bliesner (1990) destacam que os coeficientes de uniformidade respondem principalmente às diferenças individuais de vazão ao longo do sistema. Assim, quanto maior a dispersão entre as lâminas aplicadas, menor será a uniformidade observada.

Nesse contexto, quando poucos emissores apresentam obstrução, a discrepância entre suas vazões reduzidas e as vazões normais dos demais emissores gera elevada variabilidade, resultando em quedas acentuadas da uniformidade. À medida que o número de emissores obstruídos aumenta e as restrições se tornam mais homogêneas, a diferença relativa entre as vazões diminui, reduzindo o impacto incremental sobre os índices de uniformidade ainda que o desempenho hidráulico piore conforme o aumento da quantidade de entupimentos. Essa dinâmica explica por que cenários com entupimento mais generalizado podem apresentar maior estabilidade nos coeficientes, ainda que em níveis inferiores de desempenho,

ratificando o argumento das respostas à uniformidade por Keller e Bliesner (1990). Assim, a aparente estabilidade observada em determinados cenários não reflete melhoria do sistema, mas sim uma redução relativa da variabilidade entre emissores, coerente com a forma como os coeficientes de uniformidade respondem às diferenças individuais de vazão. Essa ocorrência constrói o dilema entre uniformidade e eficiência.

## **2.4 Uniformidade e produtividade agrícola**

A relação entre a uniformidade e a produtividade trata as lâminas (de demanda ou aplicada) como parâmetro. Em conjunto aos dados de sensibilidade da cultura ao estresse hídrico, torna-se possível propor estimativas de lâmina ótima a ser irrigada para uma cultura específica. Mantovani et al. (1995) testou um modelo para relacionar, compreendendo que a lâmina ótima de irrigação depende diretamente da uniformidade de aplicação d'água, onde sistemas com baixa uniformidade de distribuição precisam adotar estratégias de manejo diferentes quando comparados aos sistemas que apresentem boa uniformidade. Para complementar a tomada de decisão, essa estratégia também é definida mediante a premissa de disponibilidade hídrica na região de cultivo, recomendando a irrigação acima ou abaixo da demanda de evapotranspiração da cultura.

Para ratificar a relevância da uniformidade na produtividade, Freitas et al. (2003) encontram equação de regressão para o milho em função da lâmina de água sob a condição de boa uniformidade do sistema de irrigação utilizado. No cultivo do feijão, utilizou-se o sistema com baixa uniformidade e o resultado foi a impossibilidade de encontrar regressão bem ajustada para representar a produtividade em função das lâminas aplicadas.

## **2.5 Cultura do milho**

O milho (*Zea mays* L.) constitui uma cultura estratégica para o agronegócio brasileiro, tanto pelo volume produzido quanto pela diversidade de aplicações industriais e agropecuárias. Com elevada relevância na cadeia produtiva de rações animais, o milho é o segundo grão mais cultivado no país, concentrando-se principalmente nas regiões Centro-Oeste e Sul (SOUZA et al., 2018).

Desde a década de 1980, a produção de milho vem apresentando crescimento expressivo, acompanhando a expansão da pecuária nacional. Esse avanço, impulsionado por fatores macroeconômicos e avanços tecnológicos em genética e infraestrutura tornou a cultura financeiramente atrativa aos produtores (CALDARELLI; BACCHI, 2012).

Embora o cultivo em sequeiro ainda seja predominante em muitas regiões do Brasil, estudos comparativos indicam uma tendência de expansão da agricultura irrigada. A irrigação surge como estratégia fundamental para aumentar a produtividade, sem a necessidade de expansão de áreas cultivadas. Souza et al. (2014) ao compararem as produtividades de milho irrigado e em sequeiro em regiões semiáridas do Nordeste brasileiro, observaram incrementos de até 58% na produtividade do milho irrigado. Resultados semelhantes foram relatados por Gava et al. (2018), que avaliaram sistemas irrigados por pivô central com reposição de 100% da evapotranspiração da cultura, confirmando a superioridade produtiva do milho irrigado em relação ao cultivo em sequeiro.

O suprimento hídrico também demonstrou efeitos positivos sobre a produtividade de híbridos de milho cultivados na safrinha em estudos realizados na região Centro-Oeste do Brasil, com aumentos de até 44% em relação às condições de sequeiro. Esses resultados indicam que a irrigação reduz a sensibilidade da cultura à época de semeadura, sendo fundamental para a estabilização da produção na safrinha, especialmente quando associada à semeadura antecipada em períodos de maior disponibilidade térmica e radiativa (FABRIS et al., 2023).

Em Minas Gerais, o cultivo do milho possui forte tradição histórica, desde o período colonial até a adoção de tecnologias produtivas modernas. A cultura apresenta maior predominância nas regiões do Oeste, do Alto Paranaíba, do Triângulo Mineiro e do Sul de Minas (GARCIA et al., 2006), sendo a produção majoritariamente destinada ao atendimento da demanda interna do estado. Na safra 2024/2025, Minas Gerais ocupou a quinta posição em área cultivada e produção de milho, além da oitava posição em produtividade no cenário nacional (CONAB, 2025).

A cultura do milho apresenta considerável demanda hídrica ao longo da safra, com a evapotranspiração entre os 500 *mm* e 800 *mm*, a depender das condições climáticas nas regiões cultivadas (CRITCHLEY; SIEGERT, 1991). Experimentos conduzidos no sudoeste dos Estados Unidos indicaram valores de evapotranspiração sazonal do milho entre aproximadamente 634 *mm* e 780 *mm*. As aplicações de lâmina

variaram entre 500 *mm* e 1100 *mm*, com médias de demanda em torno dos 800 *mm*, caracterizando elevada exigência hídrica em regiões semiáridas (DJAMAN et al., 2018). No Brasil, a demanda de evapotranspiração acumulada para a cultura do milho no semiárido apresentou lâminas entre 450 *mm* e 650 *mm*, condicionadas às projeções classificadas de mudanças climáticas (CAVALCANTE JUNIOR et al., 2018).

## 2.6 Modelos de predição na cultura do milho

Modelos de predição de produtividade têm sido amplamente desenvolvidos usufruindo de abordagens estatísticas, dados climáticos e técnicas de aprendizado de máquina. São métodos que permitem estimar produtividade a partir de parâmetros ambientais, de manejo agrícola e dados espectrais. Modelos de aprendizado de máquina, quando atuados de forma conjunta, são capazes de fornecer previsões com maior precisão e flexibilidade, com redução de enviesamento ou variância. A aplicação das ferramentas estimou, com eficácia, a produtividade do milho nos Estados Unidos, usufruindo de dados meteorológicos completos e parciais (SHAHHOSSEINI et al., 2020).

A utilização de redes neurais artificiais guarnecidas por parâmetros climáticos, pedológicos, de balanço hídrico e propriedades agronômicas de híbridos de milho, estratificadas por dados fenológicos, são capazes de estimar a produtividade mesmo com a ocorrência de imputação de dados faltantes. Variáveis climáticas e hídricas, aplicadas em diferentes fases de desenvolvimento, apresentam maior ponderação na predição de produtividade frente às características agronômicas das cultivares, evidenciando a capacidade das redes neurais artificiais em capturar interações não lineares entre genótipo e o ambiente (SOUZA et al., 2023).

Imagens multiespectrais, informações técnicas de irrigação e dados climáticos são capazes de colaborar em predições da produtividade do milho quando associadas aos algoritmos de aprendizado de máquina, segundo Baio et al. (2023). Em conjunto, revelaram que a posse dos dados multiespectrais e de irrigação favoreceram a aplicação de modelos de *Random Forest* para geração de estimativas rápidas e não destrutivas da produtividade.

Os modelos de aprendizado de máquina mostram-se como boas alternativas para otimizar os modelos empíricos ou estatísticos consolidados, melhorando as previsões da produtividade. Integrando múltiplas fontes de dados climáticos, índices

de vegetação, dados pedológicos e sistemas de fertilização, a aplicação do aprendizado de máquina possibilita maior desempenho preditivo na cultura do milho (MENG et al., 2021). No experimento citado, o *Random Forest* e o *Adaptive Boosting* apresentaram o melhor desempenho quando combinados aos conjuntos de dados, revelando que a inclusão de informações sobre fertilizantes e a combinação específica entre índices de vegetação, clima e solo aumentaram consideravelmente a acurácia preditiva, reforçando o potencial de abordagens integradas e multiescala para a previsão de produtividade sob diferentes manejos agrícolas.

González-Sánchez et al. (2014) compararam a acurácia preditiva de técnicas de aprendizado de máquina para a previsão da produtividade em dez conjuntos de dados de culturas agrícolas no México, incluso o milho. Os algoritmos *M5-Prime Regression Trees* e o *K-Nearest Neighbors* mostraram-se promissores para o planejamento agrícola em larga escala, onde a convergência desses resultados validou a importância da escolha adequada do algoritmo para diferentes contextos e culturas; e da integração de diferentes variáveis preditoras para geração de estimativas precisas e não destrutivas da produtividade, contribuindo diretamente para a segurança alimentar e o planejamento do setor.

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

A localização definida para a realização dos testes de uniformidade de Christiansen foi o Pivô Central pertencente à Unidade de Ensino, Pesquisa e Extensão (UEPE). Essa unidade está localizada no município de Coimbra-MG e pertence à Universidade Federal de Viçosa (UFV). Suas coordenadas geográficas são 20° 49' 51,17" S e 42° 45' 57,49" O, com altitude de 715 metros acima do nível do mar. O clima desse local (tropical de altitude) foi classificado como Cwb, conforme a classificação de Köppen (ALVARES et al., 2013).

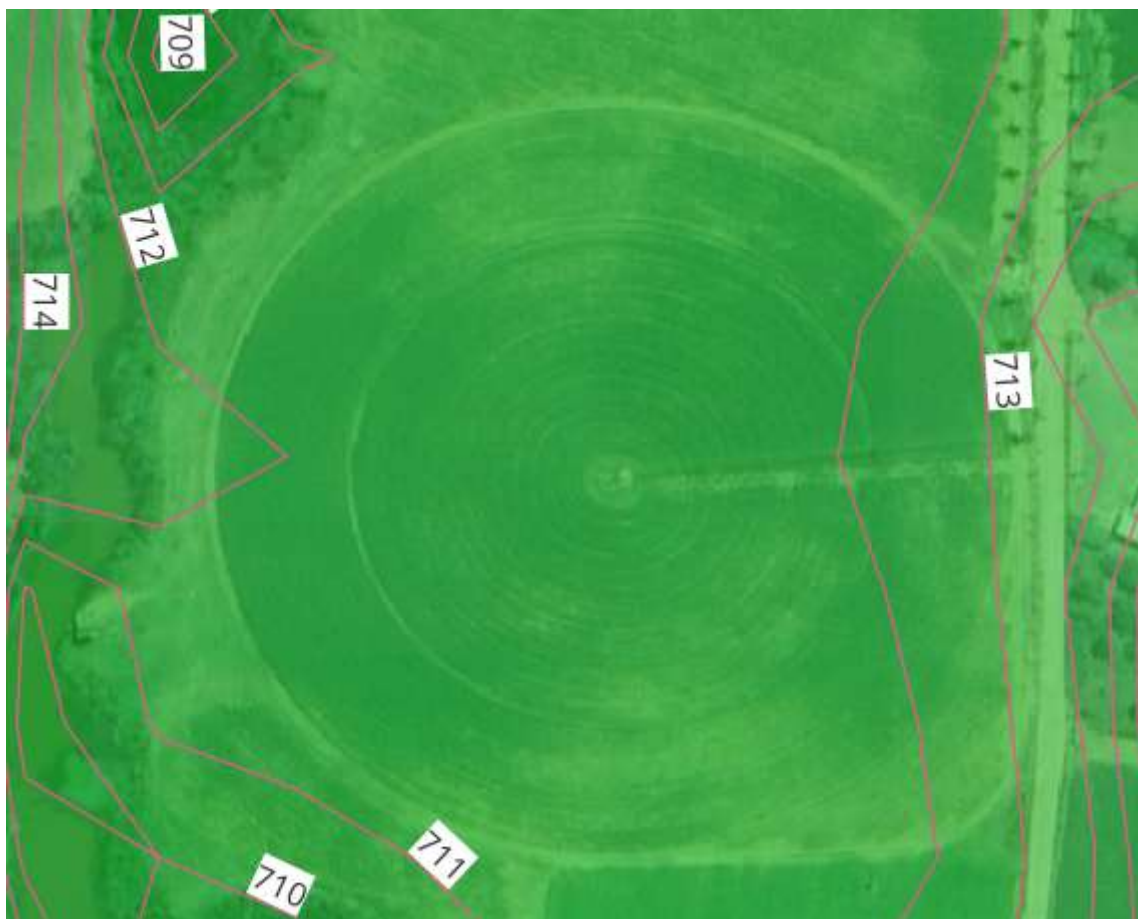
O pivô central utilizado no estudo é do modelo Light, produzido pela ASBRASIL S/A, fabricante associada da VALMATIC, da Valley®, empresa do grupo Valmont Industries Incorporated®. O sistema é alimentado por um conjunto motobomba centrífuga KSB® para motor trifásico com diâmetro nominal do rotor em 160 *mm* e motor elétrico WEG®, de 7,5 cv e 3.490 rotações por minuto. Não foram encontrados registros sobre a idade operacional do sistema.

O pivô irriga uma área circular com raio de 82,50 metros, totalizando uma superfície de 2,14 hectares. O sistema é composto por uma torre fixa e uma torre móvel, que sustentam, respectivamente, o lance inicial e o lance em balanço. O lance inicial conta com 23 emissores, enquanto o lance em balanço tem 13 emissores, somando 36 emissores. Todos os emissores foram enumerados sequencialmente e estão distanciados em, aproximadamente, 2,10 metros. A região da torre apresenta uma mangueira de derivação vedada, formando um vão de 4,00 metros entre os emissores 23 e 24. Os 36 reguladores de pressão (Senninger Irrigation Incorporated® – modelo PSR2 – 0,5 polegadas e faixa operacional da vazão entre 1,9 e 57 litros por minuto) mantém os 36 emissores em 10 *psi*. Todos os emissores são da fabricante Senninger Irrigation Incorporated® e modelo I-Wob2 UP3 *Rotator* (bocais entre 2,38 e 5,35 *mm* com defletores de 9 ranhuras para gotas médias, faixa de pressão entre 6 e 15 *psi* e diâmetro molhado entre 10,4 metros e 18 metros) foram classificados em dois grupos: experimentais e não experimentais.

Com o objetivo de identificar diferenças de nível na área de abrangência do pivô, foi realizado o levantamento do perfil altimétrico via Modelos Digitais de Elevação (MDE) – Copernicus, com resolução espacial de 30 metros. A ferramenta colaborou na definição do melhor posicionamento das hastes para a realização dos testes de

uniformidade de Christiansen, posicionando-as em perímetros sem ocorrência de declividade. A Figura 1 apresenta o MDE concomitante às curvas de nível da área.

Figura 1 – Modelo digital de elevação e curvas de nível da área de estudo



Fonte: Autor

### 3.1 Etapas de validação

Para a execução dos testes de uniformidade de Christiansen, foram realizadas etapas preliminares com o objetivo de verificar as condições de operação do sistema. Inicialmente, foram realizadas checagens de obstruções e o mapeamento dos bocais. Em seguida, foram conduzidos testes de vazão e de pressão para verificar a normalidade do funcionamento hidráulico do pivô. Para a posterior análise do impacto dos entupimentos nos coletores, realizou-se também o teste de diâmetro molhado nos emissores experimentais. Após o acionamento do conjunto motobomba, os ensaios foram iniciados somente após transcorridos 5 minutos desde a última ocorrência de expurgo de ar no sistema. Os testes foram realizados com válvula totalmente aberta.

### 3.1.1 Teste de vazão

O teste de medição de vazão foi realizado em todos os 36 emissores do sistema. Foram utilizados um coletor direcional valvulado, um cronômetro (escala em segundos), uma proveta graduada de 1 L e um balde transparente de 18 L. Para cada emissor, foram estabelecidos volumes-alvo e realizadas três repetições, registrando-se o tempo decorrido desde o direcionamento do jato ao balde até atingir o volume-alvo indicado na escala graduada. Adotou-se a condição de que os tempos de coleta das amostras volumétricas fossem superiores a 20 s, conforme recomendação de Bernardo et al. (2019) para o método volumétrico direto.

A vazão foi determinada pela relação entre volume e tempo, conforme a Equação (1):

$$Q_i = \frac{V_{ij}}{t_{ij}} \quad (1)$$

Em que:

$Q_i$  = Vazão no emissor de ordem  $i$  em  $Lh^{-1}$ ;

$V_{ij}$  = Volume de ordem  $j$  coletado no emissor de ordem  $i$  em L;

$t_{ij}$  = Tempo de coleta para a amostra de volume de ordem  $j$  coletado no emissor de ordem  $i$  em  $h$ .

Ao todo, foram realizados 108 testes de medição de vazão. Sempre que foram identificados valores de vazão destoantes dos valores esperados, procedeu-se à repetição das medições, a fim de assegurar a confiabilidade dos dados. Posteriormente, os valores médios de vazão  $\bar{Q}_i$  foram comparados com aqueles informados no catálogo do fabricante dos emissores. A comparação foi realizada por meio da razão percentual entre as respectivas vazões em conjunto ao cálculo do erro relativo ( $-100 + \text{Razão percentual}$ ), permitindo diagnosticar anomalias ou desgaste dos equipamentos.

### 3.1.2 Teste de pressão

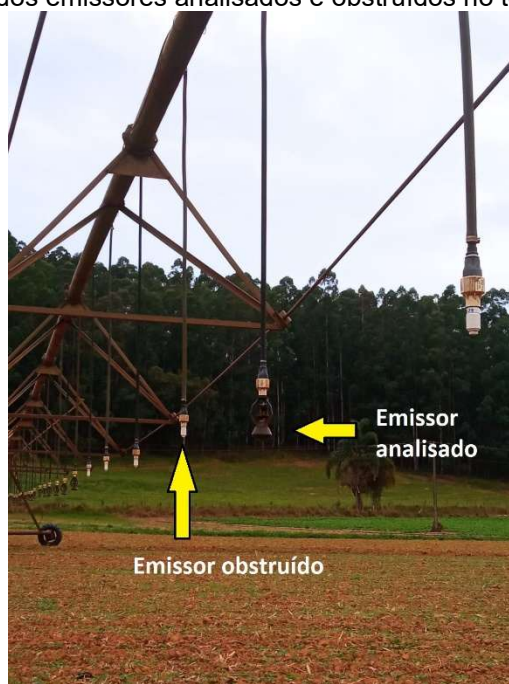
O teste de pressão teve como objetivo verificar a perda de carga ao longo do sistema. Foram utilizados dois manômetros Wika® (150 *psi* e 10 *bar*), com precisão de 2 *psi* e 0,2 *bar*, em conformidade com a ABNT NBR 14105-1:2013.

O primeiro manômetro foi instalado na mangueira de derivação do emissor 1 e o segundo na mangueira de derivação do emissor 36, em ambos os casos após a desinstalação dos respectivos emissores e reguladores de pressão. Os manômetros foram posicionados e alinhados na altura dos emissores para a leitura. Foram registradas duas pressões, denominadas  $P_1$  e  $P_2$ , que posteriormente foram convertidas em metros de coluna d'água. A partir desses valores, foi obtida uma média representativa da perda de carga no sistema entre os extremos avaliados.

### 3.1.3 Teste de diâmetro molhado

Foram realizados testes de diâmetro molhado nos emissores experimentais. Para cada emissor experimental avaliado, vedaram-se até 8 mangueiras de derivação vizinhas, 4 a montante e 4 a jusante, com o objetivo de evitar a interferência da precipitação proveniente de emissores adjacentes. Nos casos em que a posição do emissor (início ou final do pivô) limitava o número de vizinhos, vedou-se a quantidade máxima. Na Figura 2 é ilustrado o procedimento de vedação das vizinhanças para um emissor analisado.

Figura 2 – Identificação dos emissores analisados e obstruídos no teste de diâmetro molhado



Fonte: Autor

Após a instalação das vedações, o pivô central foi acionado e, decorridos cinco minutos após o último expurgo de ar, procedeu-se à demarcação, por meio de estacas, das distâncias alcançadas pelas gotas mais distantes emitidas pelo emissor. As distâncias entre as estacas, aferidas com trena, permitiram determinar o diâmetro molhado do emissor em teste.

Posteriormente, os valores obtidos foram comparados aos informados no catálogo do fabricante.

### 3.1.4 Teste de uniformidade

O procedimento seguiu a metodologia prescrita pela ABNT NBR ISO 11545:2016, que estabelece a disposição de duas linhas de coletores, com espaçamento angular de  $3^\circ$  entre si. A norma também determina que coletores de mesma ordem em linhas distintas apresentem distâncias alternadas em relação ao centro do pivô.

A projeção georreferenciada das linhas foi realizada por meio do *software* de código aberto QGIS® (versão 3.42 Münster) em conjunto com o Google Earth Pro® (versão 7.3.6.10201, 64-bit). As conversões de formato foram realizadas com o serviço online GPS Visualizer e os arquivos foram transferidos para um receptor GPS

Garmin® eTrex10, utilizado no estaqueamento das linhas e na implantação das hastes de coletores.

As linhas foram denominadas A e B, e os coletores foram posicionados com espaçamento de 0,5 m. Em cada linha, foram instalados 157 coletores, abrangendo o intervalo desde o raio molhado do primeiro emissor até o ponto imediatamente abaixo do último emissor. Em ambas as linhas, o coletor de ordem 104 foi projetado com um afastamento de 1,5 m em relação ao coletor 105, devido ao percurso dos rodados da torre. Todos os coletores apresentaram área de seção transversal padrão de 50,2654 cm<sup>2</sup>. Na Figura 3 é apresentado o posicionamento das linhas de coletores na área.

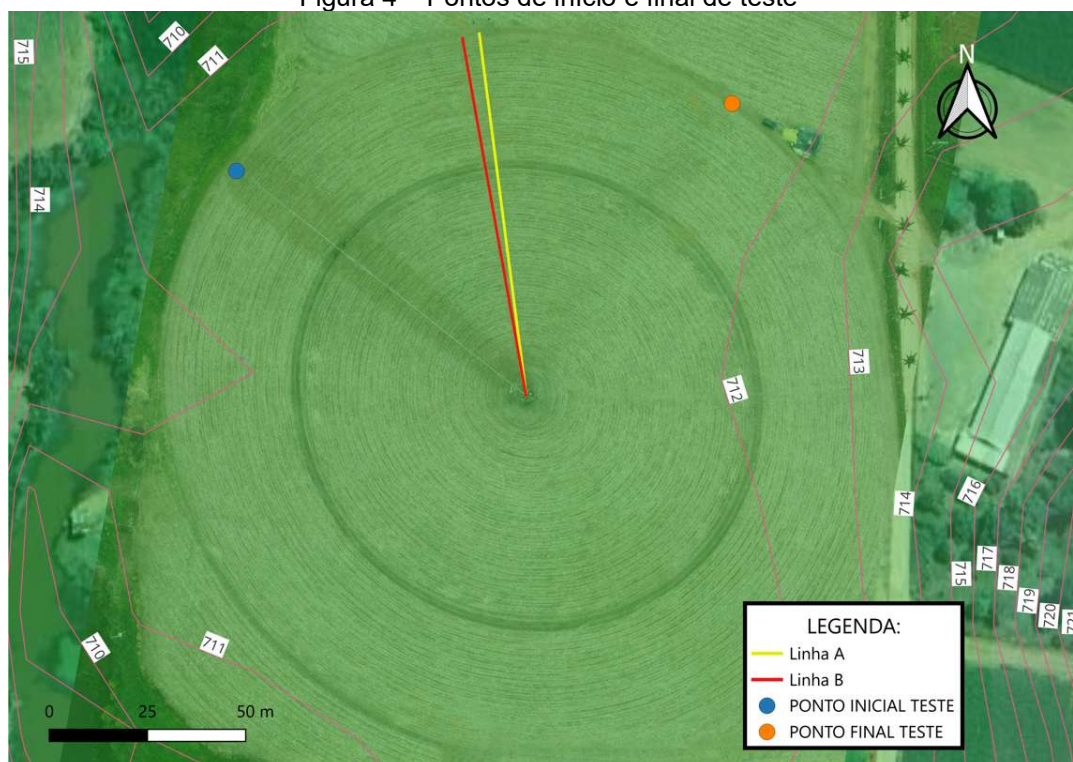
Figura 3 – Posicionamento das linhas de coletores A e B



Fonte: Autor

Após a montagem das linhas de coletores, o pivô central foi posicionado de modo que o primeiro aspersor não promovesse a aplicação de água sobre os coletores das linhas A e B; de forma análoga, a posição final foi definida para assegurar a ausência de precipitação sobre os últimos coletores. Na Figura 4 é apresentado o georreferenciamento dos pontos de início e término do teste.

Figura 4 – Pontos de início e final de teste



Fonte: Autor

A ABNT (2016) recomenda a aplicação de lâmina mínima de 15 *mm* para ensaios de uniformidade, resguardando condições circunstanciais associadas às culturas irrigadas. Contudo, durante a realização dos testes, a área encontrava-se com cultivo de feijão em estágio de semeadura, e as características operacionais da unidade exigiriam a regulação do percentímetro para valores inferiores ao de 20% para atingir a lâmina recomendada, o que inviabilizaria o ensaio. Assim, optou-se pela execução dos testes com o percentímetro regulado em 100%, resultando em lâmina média estimada de 2,05 *mm*.

Adicionalmente, estabeleceu-se a movimentação do pivô em sentido único para a realização de todos os ensaios. Dessa forma, após a partida a partir do ponto inicial, a linha de coletores B passava a receber precipitação antes da linha de coletores A; de modo análogo, ao término do ensaio, a coleta era finalizada primeiro na linha B e, subsequentemente, na linha A.

Por razões operacionais e para reduzir perdas por evaporação, estabeleceu-se que a leitura dos volumes coletados seria iniciada apenas após o encerramento do teste e o desligamento do sistema. A leitura começou no centro do pivô e seguiu até a extremidade do raio. A primeira leitura foi realizada no coletor de ordem 1 da linha

B, e a última no coletor de ordem 157 da linha A. Os horários de leitura foram registrados. Utilizou-se proveta graduada de 25 mL, com precisão de 0,5 mL.

### 3.1.5 Vento e evaporação

Com o uso de um anemômetro digital PeakMeter® (modelo PM625B), foram coletados dados de velocidade do vento ( $m s^{-1}$ ), umidade relativa do ar (%) e temperatura ambiente ( $^{\circ}C$ ). Para caracterizar a direção do vento, utilizou-se o aplicativo Bússola (versão 9.6.9.1.0) em *smartphone* Xiaomi Redmi 9®, registrando-se o azimute e a orientação em ponto cardeal ou colateral. As medições foram realizadas repetidamente ao longo de todo o ensaio, com ênfase no instante em que o pivô se encontrava entre as duas linhas de coletores. Foram registradas as velocidades máximas observadas durante os testes. Todas as medições foram realizadas a 2 m de altura em relação ao solo

Não foram adotados valores críticos de velocidade do vento como critério para interromper os ensaios. Os dados foram organizados em arquivo no formato CSV no Microsoft® Excel 2021 e, posteriormente, analisados por meio de rotinas estatísticas em linguagem Python no ambiente Google® Colaboratory. Foram utilizadas as bibliotecas: (i) *pandas*, para manipulação de dados e *dataframes*; (ii) *matplotlib*, para elaboração de gráficos; e (iii) *seaborn*, para apoio à interpretação dos dados. A construção de *boxplots* com a distribuição dos dados dos testes de uniformidade permitiu estatísticas descritivas que auxiliassem na identificação de direções de vento potencialmente associadas a maiores impactos nos percentuais de uniformidade observados para cada teste.

Conforme a ABNT (2016), os testes de uniformidade exigem amostras de evaporação para estimar as perdas. Para isso, instalaram-se três coletores isolados, espaçados a cada 2 m, em regiões fora do raio de alcance do pivô, evitando o efeito de microclima decorrente do aumento da umidade na área irrigada. Antes do início dos ensaios, foram adicionados 50 mL de água a cada coletor, com uma proveta de 100 mL (precisão de 1 mL). Ao final de todas as leituras nas linhas, os volumes remanescentes foram medidos novamente. A diferença entre os volumes inicial e final em cada coletor isolado foi considerada representativa da evaporação. Os horários de adição e de coleta foram registrados, permitindo o cálculo de uma taxa média de perda volumétrica ao longo do tempo.

Com os horários de leitura individuais de cada coletor e a taxa média estimada, foi possível estimar o volume evaporado de cada um dos 314 coletores, como o produto entre a taxa e o tempo de exposição. Para a correção individual, o volume evaporado estimado foi somado ao volume amostral medido. A Equação (2) representa o modelo utilizado para estimar o volume corrigido, posteriormente empregado no cálculo da uniformidade:

$$V_{\text{corrigido}_{ij}} = V_{\text{amostral}_{ij}} + \frac{\overline{\Delta \text{Volume Evaporado}}}{\text{Tempo}_{\text{Total Teste}}} * T_{\text{exposto}_{ij}} \quad (2)$$

Em que:

$V_{\text{corrigido}_{ij}}$  = Volume corrigido no coletor  $i$  da linha  $j$  em  $mL$ ;

$V_{\text{amostral}_{ij}}$  = Amostra de volume no coletor  $i$  da linha  $j$  em  $mL$ ;

$\overline{\Delta \text{Volume Evaporado}}$  = Média dos volumes evaporados nos 3 coletores amostrais de evaporação, em  $mL$ ;

$\text{Tempo}_{\text{Total Teste}}$  = Tempo decorrido entre o acréscimo e a coleta de volume nos coletores amostrais de evaporação, em minutos e,

$T_{\text{exposto}_{ij}}$  = Tempo exposto do volume amostral no coletor  $i$  da linha  $j$  em  $mL$ .

### 3.2 Testes para avaliação do Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC) e adaptação para pivôs centrais por Heermann e Hein (1968)

Proposto por Christiansen (1942), o Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC) foi adotado neste trabalho como metodologia para quantificar a uniformidade da distribuição da lâmina de água aplicada pelo sistema. O método pressupõe a disposição de coletores de modo que haja equivalência entre suas áreas de influência, permitindo comparar as lâminas coletadas e estimar o grau de homogeneidade da aplicação. Na Equação (3) é apresentada a formulação clássica do CUC, relacionando as lâminas individuais e a lâmina média.

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

Em que:

$CUC$  = Coeficiente de Uniformidade de Christiansen, em %;

$X_i$  = Lâmina de água aplicada no coletor de ordem  $i$ , em  $mm$ ;

$\bar{X}$  = Lâmina Média Aplicada pelo sistema, em  $mm$  e

$N$  = Número de coletores.

Em sistemas de irrigação por pivô central, entretanto, cada emissor é responsável por diferentes unidades de área em função da distância a partir do centro do pivô. Para que a lâmina média aplicada seja adequadamente ajustada ao longo do raio, é necessária a instalação de emissores com vazões distintas ao longo do equipamento. De forma análoga, coletores dispostos radialmente representam áreas de influência distintas, o que inviabiliza o uso direto da formulação clássica sem ponderação.

Dessa forma, é necessário estabelecer uma lâmina média ponderada considerando o raio. Isto é, considerando a distância entre o centro do pivô e a posição de cada coletor. Heermann e Hein (1968) propuseram, para avaliações em pivôs centrais, a modificação do método de Christiansen (1942), apresentada na Equação (4). Nessa formulação, um dos parâmetros centrais é a lâmina média ponderada, definida pela Equação (5).

$$CUC_{HeermannHein} = 100\left(1 - \frac{(\sum_{i=1}^n S_i |X_i - \bar{X}|)}{\sum_{i=1}^n X_i S_i}\right) \quad (4)$$

Sendo  $\bar{X}$  dado por:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i S_i}{\sum_{i=1}^n S_i} \quad (5)$$

Em que:

$CUC_{HeermannHein}$  = Coeficiente de Uniformidade de Christiansen adaptado, em %;

$S_i$  = Distância do coletor de ordem  $i$  ao centro do pivô, em  $m$ ;

$X_i$  = Lâmina de água aplicada no coletor de ordem  $i$ , em  $mm$ ;

$\bar{X}$  = Lâmina média ponderada, em  $mm$ ; e

$n$  = Número de coletores.

Como os coletores de mesma ordem nas linhas A e B foram posicionados a distâncias distintas em relação ao centro do pivô (conforme prescrito pela ABNT NBR ISO 11545:2016), o cálculo do CUC adaptado (HEERMANN; HEIN, 1968) foi realizado separadamente para cada linha de coletores. Para cada teste de uniformidade, em planilha de cálculo desenvolvida especificamente para a formulação corrigida, calculou-se o coeficiente para as linhas A e B e, posteriormente, a média desses valores foi reportada como valor final do teste.

Todos os testes do CUC adaptado receberam correção das lâminas em função da evaporação, mantendo também os resultados pré-correção para comparações. Em complemento, os resultados dos testes foram classificados em intervalos percentuais. Mantovani (2001) e a ABNT (2016) propuseram classificações operacionais do CUC, apresentadas nas Tabelas 1 e 2, respectivamente.

Tabela 1 – Classificação do Coeficiente de Uniformidade de Christiansen proposta por Mantovani (2001)

<b>Classificação</b>	<b>CUC (%)</b>
Excelente	> 90%
Bom	80% - 90%
Razoável	70% - 80%
Ruim	60% - 70%
Péssimo	< 60%

Fonte: Mantovani (2001)

Tabela 2 – Classificação do Coeficiente de Uniformidade de Christiansen proposta pela ABNT (2016)

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

Fonte: ABNT (2016)

### 3.3 Condições de vazão e uniformidade do sistema

Os testes de uniformidade foram planejados e classificados em duas categorias, conforme a condição de vazão dos emissores: vazão plena e vazão zero.

Nos testes em vazão plena, foram realizadas três repetições, considerando todos os emissores do pivô central (experimentais e não experimentais) operando em suas condições atuais de vazão. As amostras volumétricas obtidas e os coeficientes

calculados nessa categoria foram utilizados como referência operacional do pivô central de Coimbra. Como exemplo de aplicação, a média dos testes foi comparada aos critérios vigentes de classificação da uniformidade. Uma vez atingida a classificação de excelência e em consonância com os resultados das etapas preliminares, procedeu-se à realização dos testes na categoria de vazão zero. Os testes de vazão plena foram denominados CUCQTN, em que N representa o número de ordem do teste

Posteriormente, calculou-se a média dos volumes dos coletores de mesma linha e ordem dos testes de vazão plena. Esses volumes médios foram agrupados e empregados na composição de um teste fictício, denominado teste de referência, utilizado como cenário base para a categoria vazão zero. Na Equação (6) é apresentado o cálculo da média. Os volumes coletados e as respectivas médias por coletor são apresentados no Apêndice A (Tabela 34).

$$\bar{V}_{referência_{i,j}} = \frac{V_{CUCQ_{i,j}} + V_{CUCQ_{i,j}} + V_{CUCQ_{i,j}} + \dots + V_{CUCQTN_{i,j}}}{N} \quad (6)$$

Em que:

$\bar{V}_{referência_{i,j}}$  = Volume médio de referência do coletor  $i$ , na linha  $j$ , em  $mL$ ;

$V_{CUCQTN_{i,j}}$  = Volume amostral do coletor  $i$ , na linha  $j$  durante o teste N, em  $mL$ ; e

$N$  = Número de testes.

Os volumes de referência encontrados foram resguardados para posterior combinação com os volumes dos coletores nos testes com entupimento. Em conjunto, foram tratados como cenário de referência, sendo obtido o coeficiente de uniformidade de Christiansen.

Os testes na categoria vazão zero foram executados por meio do ajuste do pivô para simular o entupimento total em emissores selecionados como experimentais. A disposição desses emissores foi definida considerando o número total de emissores e a equidistância entre os pontos de referência ao longo da linha lateral. Com base na enumeração sequencial dos emissores, foram selecionados aqueles de numeração múltipla de três, totalizando 12 emissores experimentais: 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24, 27, 30, 33 e 36.

Durante a realização dos testes, os emissores selecionados foram substituídos por um conjunto de vedação adequado ao diâmetro da mangueira de derivação. A Figura 5 apresenta o conjunto composto por *nipples*, luvas e tampões roscáveis. Na primeira etapa dos testes de vazão zero, foram realizados testes individuais por emissor, ou seja, com o entupimento de apenas um emissor experimental. Dessa forma, os testes foram identificados como CUC Q0 EN, sendo N, o identificador do emissor experimental.

Na segunda etapa, realizou-se o agrupamento de emissores entupidos, vedando-se as vazões de seis emissores em três cenários: início do raio, meio do raio e final do raio. Adicionalmente, foi testado o cenário com os 12 emissores experimentais simultaneamente entupidos.

Figura 5 – Conjunto de vedação para simular entupimento



Fonte: Autor

### 3.4 Simulações combinatórias de cenários

Considerando os doze emissores experimentais em condição binária de vazão (entupido ou não entupido), foi possível estabelecer a existência de 4.095 cenários combinatórios de entupimento, pelo princípio fundamental da contagem, correspondentes ao número de subconjuntos próprios não vazios de um conjunto com

12 elementos. O conjunto vazio representa a ausência total de entupimentos, associada ao cenário de referência definido anteriormente. Dessa forma, totalizaram-se 4.096 cenários (incluindo o sem entupimentos).

Os testes de diâmetro molhado permitiram identificar quais coletores, por número de ordem, estão contidos no perímetro molhado de cada emissor. A Tabela 3 apresenta os coletores impactados nos cenários de entupimento individual. Ressalta-se que os coletores impactados são equivalentes para as duas linhas radiais de coleta; portanto, todos os cenários foram construídos de forma idêntica para as linhas A e B.

Os volumes coletados nos cenários de referência (sem entupimento) e nos cenários de entupimento individual foram armazenados em uma mesma planilha eletrônica no Microsoft® Excel 2021. Para evidenciar os coletores impactados, construiu-se, para cada cenário, uma coluna auxiliar composta por uma matriz binária de 157 linhas por 1 coluna. Valores zero indicaram coletores fora do perímetro molhado; valores 1 indicaram coletores contidos no conjunto impactado pelo cenário de entupimento. Essa base estruturada permitiu o encadeamento de volumes para estimar cenários simulados com dois ou mais emissores entupidos.

Tabela 3 – Número de ordem dos coletores impactados por emissor para as linhas A e B

<b>Emissor</b>	<b>Coletor</b>
E3	5-24
E6	18-37
E9	29-50
E12	41-64
E15	54-77
E18	66-91
E21	78-103
E24	93-118
E27	103-132
E30	117-144
E33	129-156
E36	139-157

Fonte: Autor

### 3.4.1 Encadeamento de volumes para construção de cenários

Para cada um dos 4.096 cenários, existem volumes correspondentes nos coletores. Dentre esses, 17 cenários possuem volumes determinados experimentalmente em campo: o cenário de referência, os doze cenários de entupimento individual (cada qual com seus respectivos coletores impactados pelo perímetro do emissor entupido) e os quatro entupimentos coletivos realizados: começo, meio, final de linha e entupimento integral dos emissores experimentais.

Nos cenários com dois ou mais emissores entupidos, ocorrem situações em que um mesmo coletor pertence simultaneamente ao perímetro molhado de dois ou mais emissores, caracterizando sobreposição de entupimentos. Nesses casos, os volumes foram estimados por meio de uma regra de encadeamento, na qual o volume de referência é subtraído da soma das reduções individuais de volume associadas a cada emissor entupido, conforme apresentado na Equação (7). Quando a subtração resulta em valor negativo, o volume do coletor foi considerado igual a zero.

$$V_{cenário_{i,j}} = V_{ref_{i,j}} - \sum_{k=1}^n (V_{ref_{i,j}} - V_{ent_{k,i,j}}) \quad (7)$$

Em que:

$V_{cenário_{i,j}}$  = Volume ajustado do coletor de ordem  $i$  na linha  $j$  sob condição de sobreposição, em  $mL$ ;

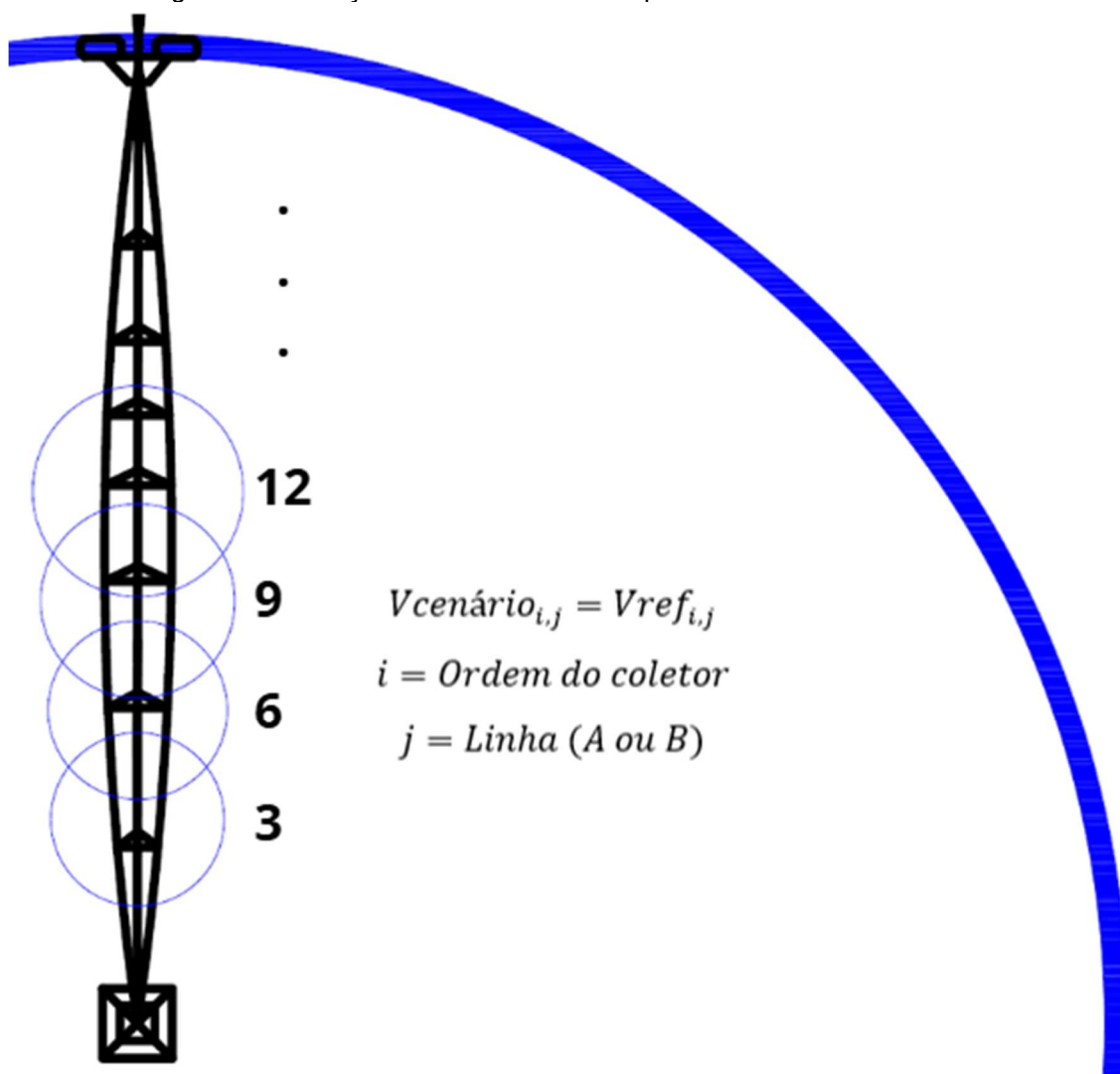
$V_{ref_{i,j}}$  = Volume de referência (cenário sem entupimento) do coletor de ordem  $i$  na linha  $j$ , em  $mL$ ;

$V_{ent_{k,i,j}}$  = Volume observado do coletor de ordem  $i$  na linha  $j$  sob condição de entupimento no emissor  $k$ , em  $mL$ ; e

$n$  = Número de emissores que influenciaram o coletor de ordem  $i$  na linha  $j$ .

O desenvolvimento dessa relação foi iniciado com o procedimento ilustrado na Figura 6, que exemplifica a área molhada dos quatro primeiros emissores experimentais no cenário sem entupimento, irrigando os coletores e gerando os volumes de referência. Os esquemas apresentados nas Figuras 6 e 11 foram elaborados em *software* CAD (*Computer-Aided Design*).

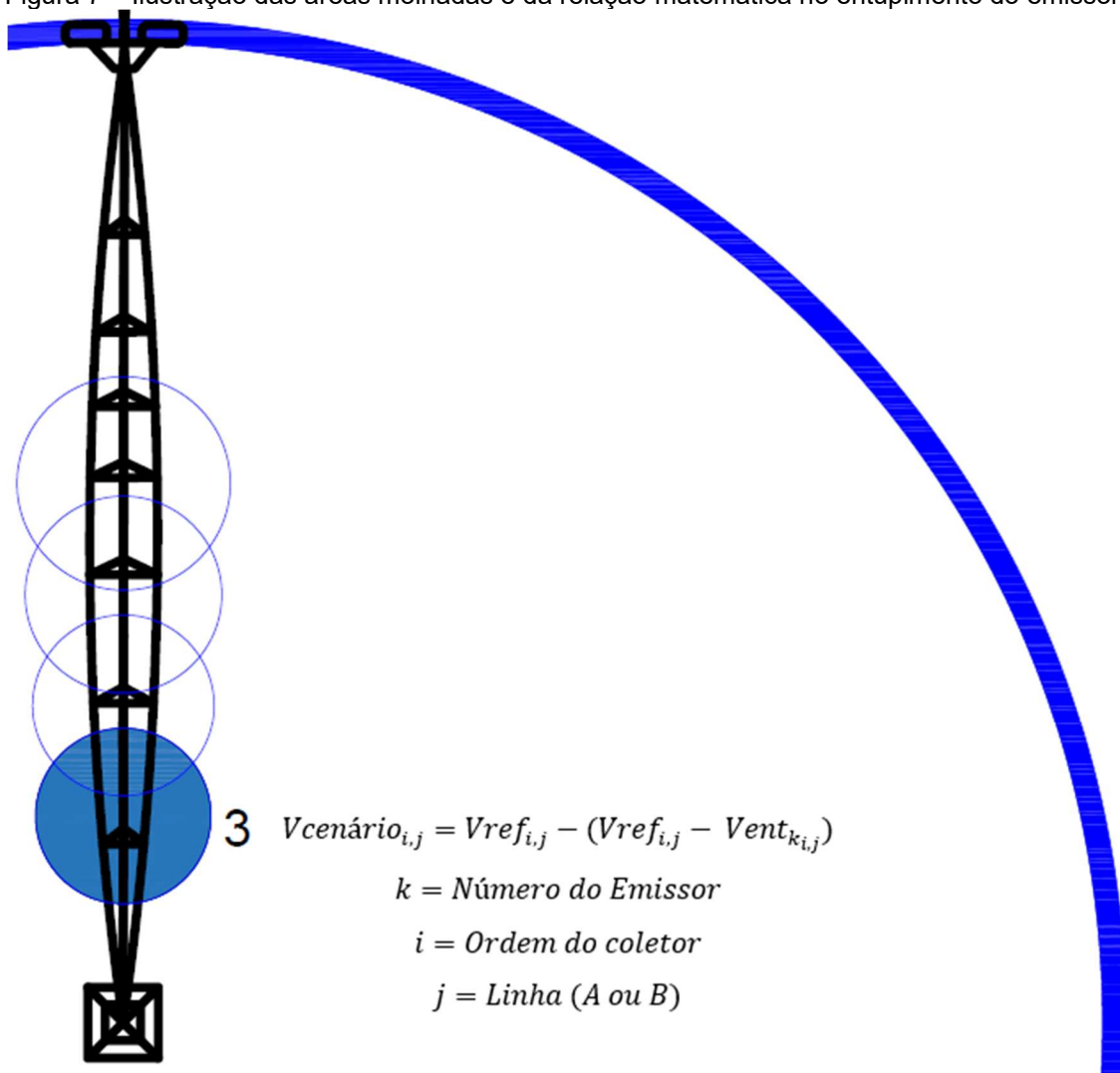
Figura 6 – Ilustração das áreas molhadas para os volumes de referência



Fonte: Autor

No cenário de entupimento do emissor 3, a relação matemática das diferenças volumétricas nos coletores localizados na área molhada do emissor é apresentada na Figura 7, sendo válida para ambas as linhas radiais (A e B) utilizadas nos testes de uniformidade.

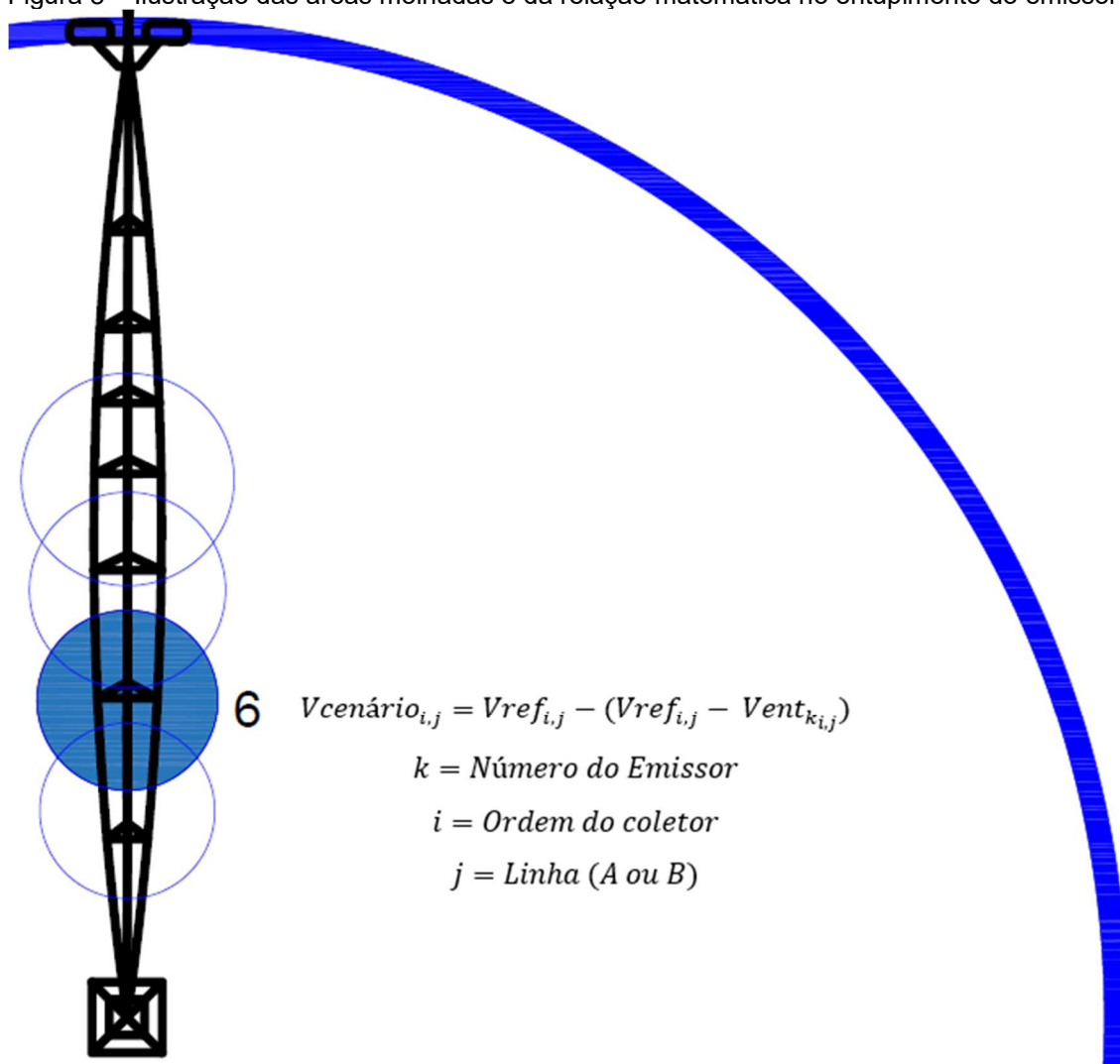
Figura 7 – Ilustração das áreas molhadas e da relação matemática no entupimento do emissor 3



Fonte: Autor

De forma análoga, a Figura 8 apresenta a relação matemática das diferenças volumétricas entre os coletores contidos na área molhada, associada ao entupimento do emissor 6, válida para ambas as linhas de coletores consideradas nos ensaios de uniformidade.

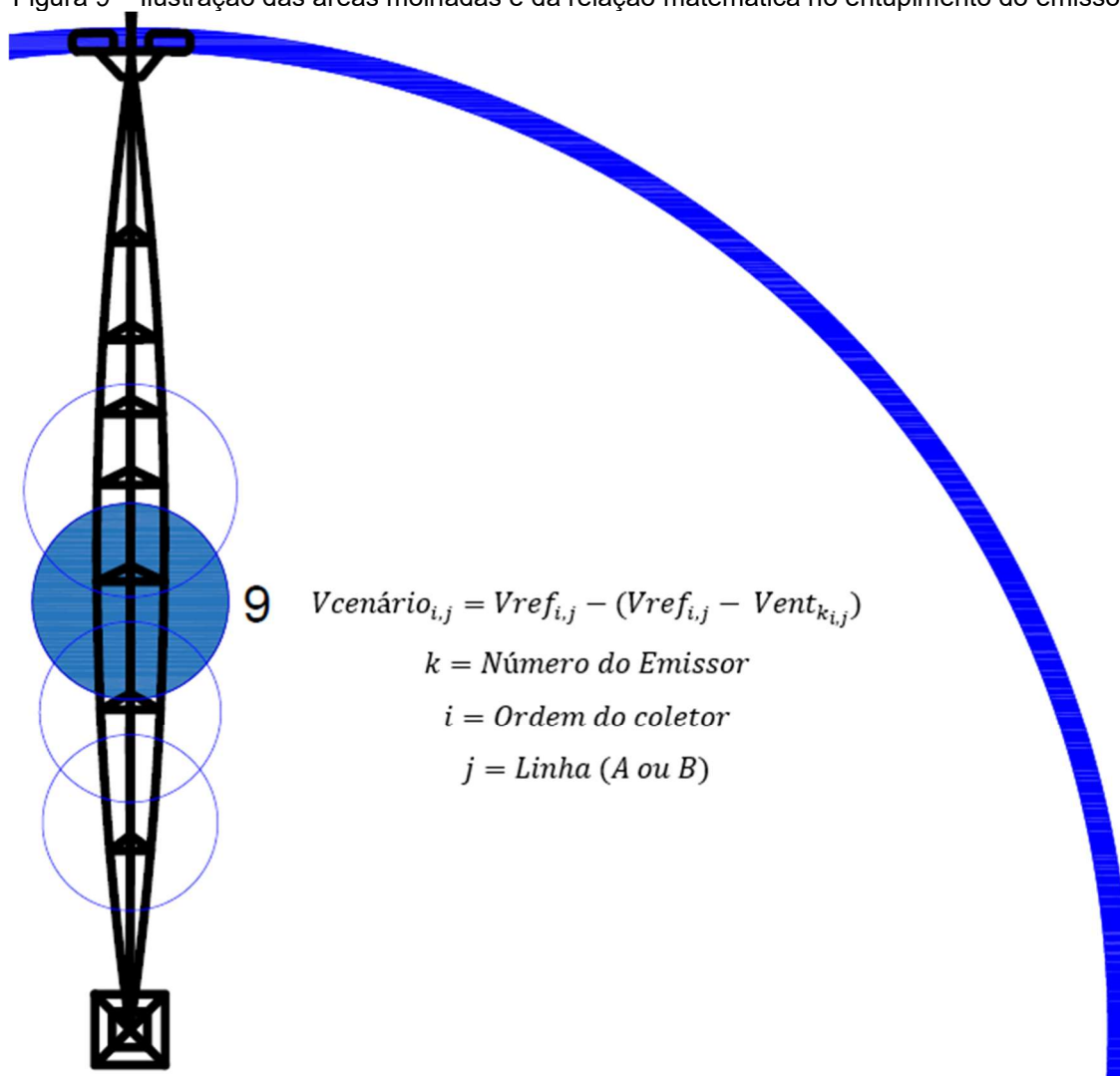
Figura 8 – Ilustração das áreas molhadas e da relação matemática no entupimento do emissor 6



Fonte: Autor

Por sua vez, a Figura 9 apresenta a relação matemática das diferenças volumétricas nos coletores contidos na área molhada associada ao entupimento do emissor 9, também válida para ambas as linhas radiais dos testes de uniformidade.

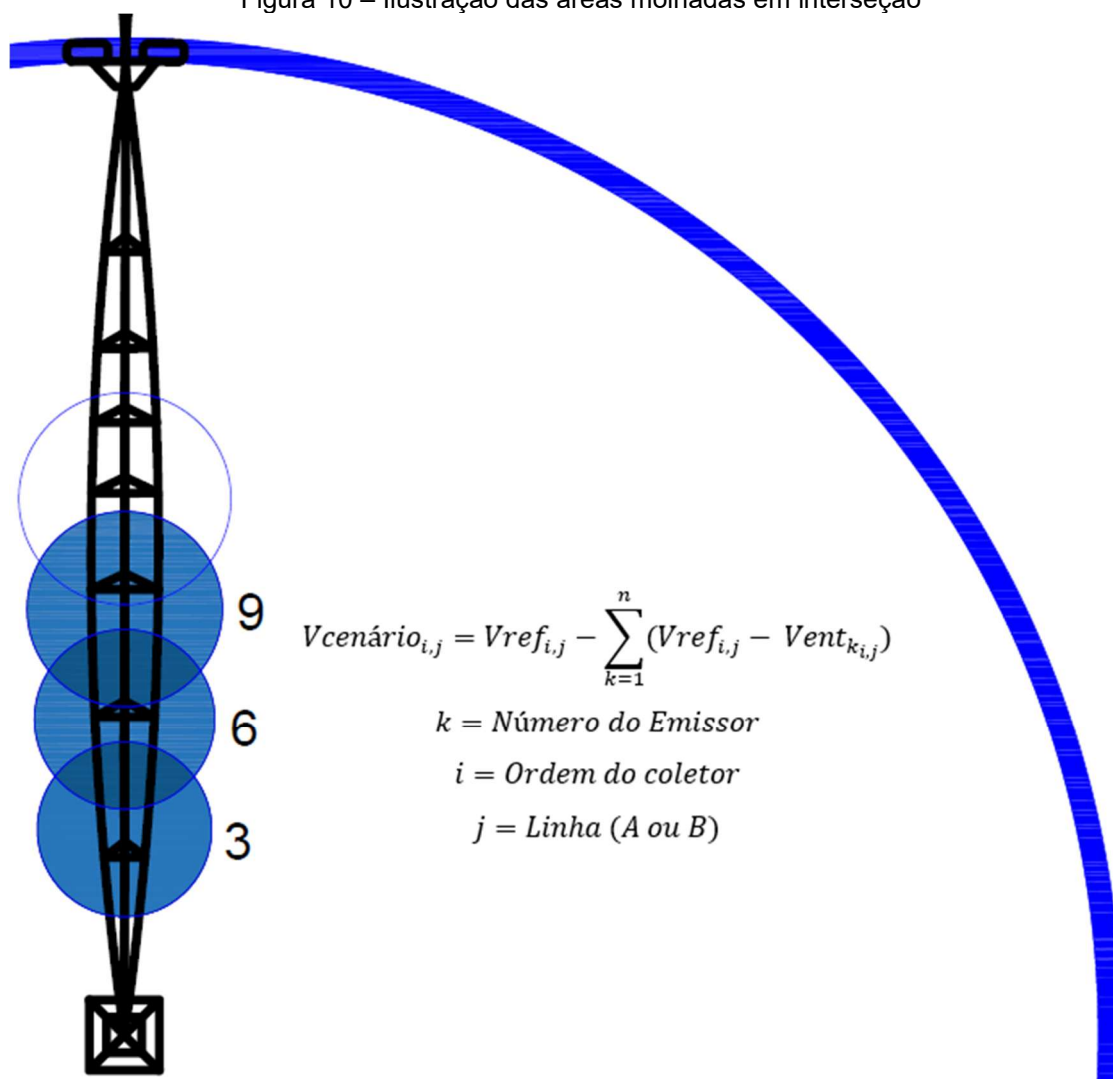
Figura 9 – Ilustração das áreas molhadas e da relação matemática no entupimento do emissor 9



Fonte: Autor

Para cenários em que ocorre entupimento simultâneo de emissores experimentais vizinhos, há regiões de coletores impactadas concomitantemente, nas quais o volume coletado é reduzido em relação ao cenário de referência (sem entupimentos), devido à sobreposição de dois entupimentos. Nesses casos, a representação matemática do volume nos coletores da interseção das áreas molhadas deve considerar a contribuição conjunta das reduções provocadas por ambos os emissores, caracterizando o processo de encadeamento. A Figura 10 ilustra a configuração de interseção entre as áreas molhadas e o princípio de cálculo das diferenças nessa condição.

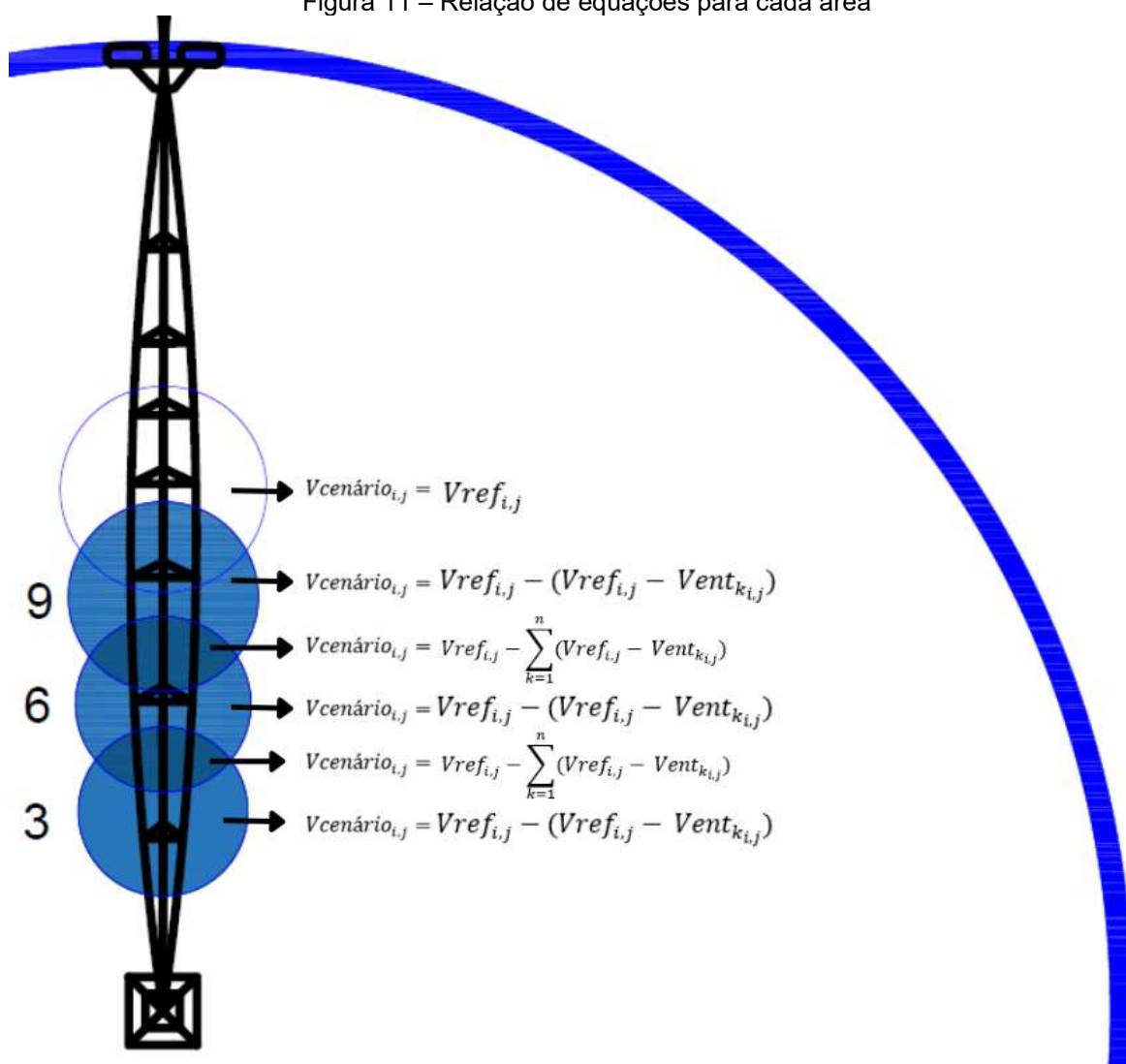
Figura 10 – Ilustração das áreas molhadas em interseção



Fonte: Autor

A Figura 11 sintetiza o conjunto de equações que descreve: (i) a contribuição dos emissores sem entupimento (cenário de referência) e (ii) as diferenças de cenário associadas às áreas de entupimento individual e às áreas de interseção, no exemplo envolvendo os emissores 3, 6 e 9.

Figura 11 – Relação de equações para cada área



Fonte: Autor

Para operacionalizar a regra de encadeamento, utilizou-se o ambiente de desenvolvimento Spyder IDE® (versão 6.0.8), no qual foram implementados *scripts* em Python® 3.11.13 integrando as bibliotecas *pandas*, *re*, *numpy* e *itertools* para o processamento sistemático dos dados experimentais. A biblioteca *re* foi empregada para padronização e reconhecimento de nomes, visando facilitar o fluxo de processamento; *itertools* foi utilizada para implementação dos princípios de análise combinatória, especialmente por meio da função geradora *itertools.combinations()*; e *numpy* foi aplicada ao processamento numérico dos volumes, permitindo cálculos em lote e a aplicação vetorizada da equação de encadeamento para todos os cenários simultaneamente.

Os resultados foram organizados em *dataframes* e exportados para uma nova planilha eletrônica no Microsoft® Excel 2021, constituindo um banco de dados para a etapa posterior de cálculo da uniformidade nos cenários gerados.

### **3.4.2 Calculadora do CUC para os cenários e análise estatística**

A partir da relação de volumes dos 4.096 cenários gerados e com base nas planilhas de cálculo do Coeficiente de Uniformidade de Christiansen adaptado por Heermann e Hein (1968), iniciou-se o processo de automatização da integração dos dados para o cálculo da uniformidade em cada cenário.

A calculadora foi estruturada em uma planilha eletrônica com três abas: (i) banco de dados de volumes; (ii) calculadora; e (iii) tabela de salvamento de dados. Para automatizar o cadastramento e registro dos resultados, desenvolveu-se uma macro em Microsoft® Visual Basic for Applications (VBA), disponibilizada ao usuário por meio de um botão na interface da planilha. Essa macro foi responsável por identificar o cenário inserido, ler os volumes presentes na tabela e salvar automaticamente os resultados calculados. Assim, a partir da inserção manual dos volumes das linhas A e B para um cenário específico, o acionamento do botão registrava, na tabela de resposta, os volumes, a identificação do cenário, bem como a média do coeficiente de uniformidade entre as linhas e a lâmina média correspondente ao teste analisado.

A inserção dos 4.096 cenários foi automatizada em Python no Spyder IDE® (versão 6.0.8), utilizando a biblioteca *win32com.client*, *os* e *time*. A biblioteca *win32com.client* possibilitou a automação de aplicações Microsoft® via programação no sistema operacional; *os* foi utilizada para operações com diretórios e gerenciamento de arquivos; e *time* permitiu controle de pausas durante a execução do código, contribuindo para o monitoramento e a estabilidade do processo de automação.

O fluxo de automação compreendeu as seguintes etapas: inicialização do programa, mapeamento dinâmico dos cenários a partir do banco de dados de volumes, transferência sistemática dos dados para a planilha calculadora, recálculo das fórmulas com execução da macro desenvolvida, iteração completa sobre todos os cenários, monitoramento do processo via interface de desenvolvimento integrado e salvamento automático dos dados ao final do processamento dos 4.096 cenários.

A tabela de resposta resultante das simulações agregou os resultados de todos os cenários, relacionando cada configuração de entupimento aos respectivos índices de uniformidade e às variáveis hidráulicas derivadas. Sua estrutura tabular, organizada em colunas, viabilizou a aplicação de métodos estatísticos e a identificação de padrões entre combinações de emissores entupidos e a degradação do CUC, fundamentando as análises comparativas e as conclusões do estudo.

Para avaliar o ajuste do modelo de simulação, compararam-se os coeficientes de uniformidade dos cenários com um único emissor entupido, obtidos por simulação, com os dados observados em campo. Após verificação da normalidade das distribuições por meio do teste de *Shapiro–Wilk*, adotou-se o teste *t* pareado com nível de significância de 5%.

Para a comparação entre simulação e campo nos cenários com múltiplos emissores entupidos (início, meio e final de raio, além do cenário com todos os 12 emissores), aplicou-se análise de regressão linear passando pela origem, adotando-se o modelo  $y_i = \beta x_i + \varepsilon_i$ , que pressupõe proporcionalidade direta entre as variáveis. A hipótese nula  $H_0: \beta = 1$  foi testada por meio da estatística *t* de *Student*, com nível de significância de 5%.

### 3.4.3 Análise do CUC dos cenários gerados

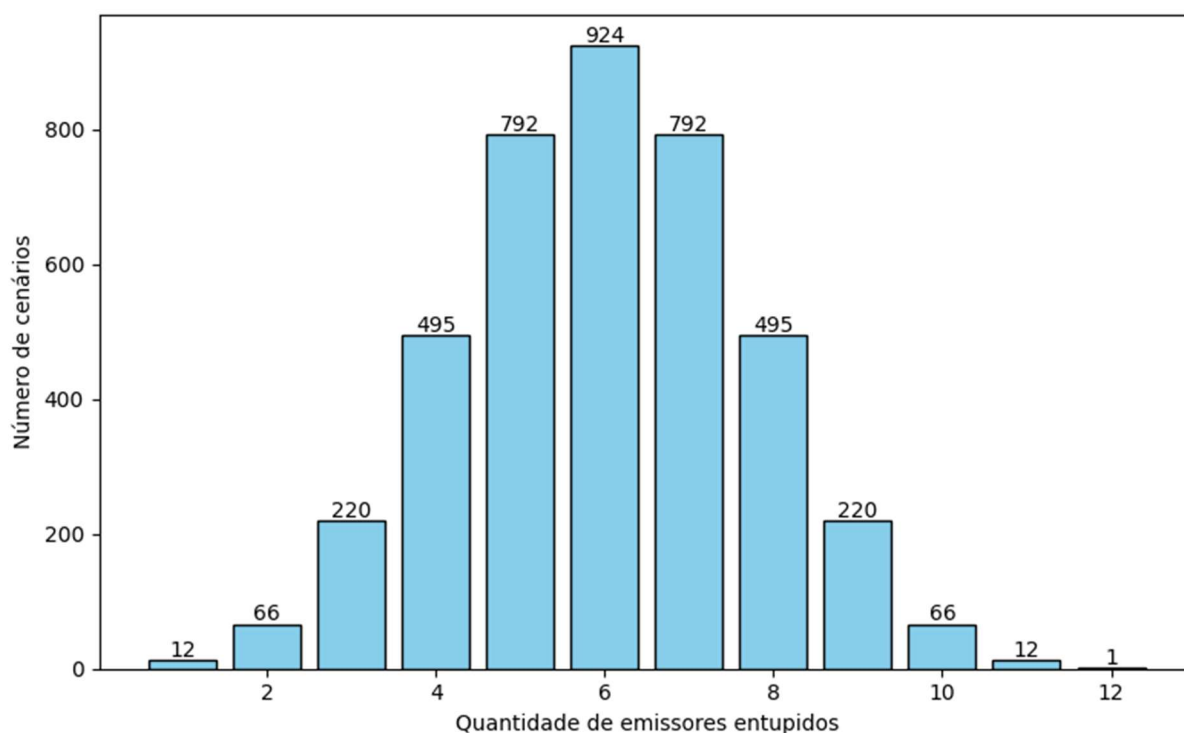
Com o objetivo de compreender a resposta do Coeficiente de Uniformidade de Christiansen em função do posicionamento e da quantidade de emissores entupidos, os cenários foram analisados por meio de uma abordagem abrangente baseada em combinatória. Os cenários com apenas um emissor entupido, os cenários com 6 entupimentos concentrados e o cenário com os doze emissores entupidos possuíam valores de uniformidade obtidos experimentalmente. Ao ampliar a análise para mais cenários, buscou-se compreender o comportamento do CUC para quantidades intermediárias de emissores entupidos, tratando os cenários em grupos exclusivos definidos pela quantidade de emissores entupidos.

Os grupos exclusivos foram estruturados como *dataframes* no ambiente Google® Colaboratory, utilizando-se linguagem Python. As bibliotecas empregadas foram: *pandas*, para construção e filtragem dos grupos; *numpy*, para processamento numérico; *matplotlib*, para construção e customização de gráficos; *seaborn*, para recursos gráficos adicionais, como regressões, mapas de calor e *boxplots*.

Na interpretação dos resultados e modelagem matemática, usou-se o *scikit-learn* para construção de modelos de regressão, transformações polinomiais, coeficientes de determinação e cálculo de erro quadrático médio; e *SciPy*, para ajuste de curvas não lineares, modelagem em potência negativa e otimização de parâmetros.

Considerando os doze emissores experimentais, determinou-se a quantidade de cenários de entupimentos correspondentes a duplas, trios, quartetos, quintetos, sextetos, septetos, octetos, nonetos, decaetos e hendecatetos, além dos cenários previamente conhecidos. A Figura 12 apresenta a distribuição do número de cenários por grupos exclusivos de emissores entupidos.

Figura 12 – Número de cenários por grupos de emissores entupidos



Fonte: Autor

A partir dessa distribuição, buscou-se interpretar o efeito do entupimento no CUC sob duas frentes complementares: quantitativa e qualitativa.

A análise quantitativa permitiu estimar a média do Coeficiente de Uniformidade de Christiansen em função do número de emissores entupidos, subdividindo-se os cenários em subgrupos com base na quantidade de entupimentos, independentemente da disposição espacial. A relação foi representada por um gráfico de dispersão e ajustada a um modelo de regressão em potência negativa, apresentando-se, conjuntamente, o desvio padrão e a distribuição dos valores em

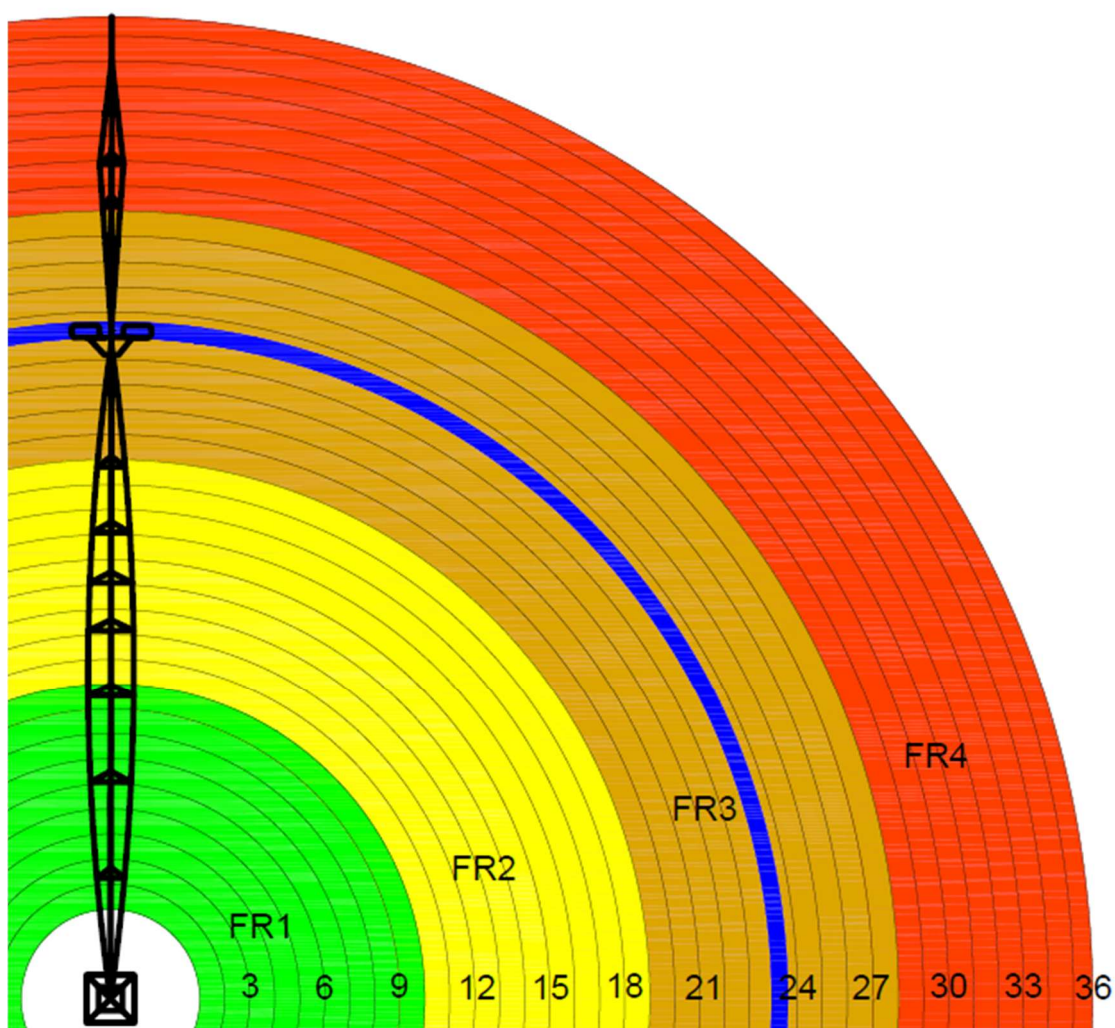
função do número de emissores entupidos. A escolha desse modelo baseou-se não apenas no coeficiente de determinação ( $R^2$ ), mas também no comportamento de decaimento típico de fenômenos hidráulicos submetidos a restrições progressivas, conforme relatado por Yavuz et al. (2010), Nakayama e Bucks (1981) e Bralts et al., (1982) para cenários de entupimento em sistemas de irrigação.

A análise qualitativa, por sua vez, considerou a disposição espacial dos emissores entupidos em todos os cenários. Para todas as combinações, foram gerados mapas de calor (*heatmaps*) bidimensionais. Nos casos de entupimento único e duplo, os emissores foram ordenados em ambos os eixos (abscissas e ordenadas), e o valor do CUC foi representado na interseção de cada par. A diagonal principal, correspondente aos pares de mesma ordem, representou os cenários de entupimento único, nos quais as coordenadas ( $i, i$ ) indicam o CUC quando apenas o emissor  $i$  está entupido. Essa representação permitiu identificar padrões de degradação da uniformidade em função da localização e da combinação dos emissores entupidos.

Entretanto, a partir do cenário com dois emissores entupidos até cenário com todos os emissores, a interpretação individual por emissor torna-se progressivamente inviável, especialmente em representações gráficas. A partir dos trios, adotou-se uma abordagem baseada em faixa radial (FR) posicional: os doze emissores foram agrupados em quatro regiões equidistantes ao longo do raio, cada uma contendo três emissores. Essa agregação, da primeira FR (início do raio) à quarta (final do raio), permitiu uma análise visual e numérica mais tratável. Cenários com a mesma combinação de faixas foram analisados conjuntamente por meio do cálculo da média do CUC. Assim, as combinações entre faixas foram representadas em gráficos bidimensionais com mapas de calor das médias, possibilitando compreender padrões de degradação da uniformidade em função das combinações espaciais dos entupimentos. A Figura 13 apresenta a disposição das faixas radiais (FRs) e de seus respectivos emissores, conforme desenho elaborado em *software* CAD (Computer-Aided Design).

O Apêndice B compartilha as rotinas de código utilizadas ao longo da metodologia para a geração dos gráficos e análise de dados.

Figura 13 – Faixas radiais do sistema e seus respectivos emissores



Fonte: Autor

#### 3.4.4 Produtividade do milho

A análise da relação entre a uniformidade de distribuição de água e a produtividade da cultura irrigada por pivô central foi conduzida com o milho como cultura de referência. Embora o milho apresente menor adesão na Zona da Mata Mineira, é uma das culturas de maior relevância no agronegócio brasileiro, com forte influência no mercado interno de rações animais (GARCIA et al., 2006; SOUZA et al. 2018).

A primeira etapa para a compreensão dessa relação consistiu na utilização de um modelo de ajuste que fosse capaz de estabelecer uma função em que a produtividade fosse a variável dependente e a lâmina aplicada a variável independente. Frizzone e Andrade Júnior (2005) e Aguiar (2005) discutem a relação entre a quantidade de insumos e a quantidade física máxima obtida por um produto,

o que, no contexto da irrigação, permite estabelecer a relação entre o fator água e a produtividade das culturas (FIGUEREDO et al., 2008).

Freitas et al. (2003) realizaram ensaios, em sistema de irrigação com uniformidade bem avaliada, para a cultura do milho no município de Coimbra–MG, durante o inverno de 1999, ajustando um modelo com base em 81 observações de produtividade, considerando como variáveis independentes a lâmina aplicada e o CUC. Entretanto, os valores de CUC não foram significativos a nível de 5% pelo teste *t* (FREITAS et al., 2003). Assim, procedeu-se ao reajuste do modelo considerando apenas a lâmina aplicada como variável independente, obtendo-se a função quadrática apresentada na Equação (8):

$$\hat{Y} = -13.917 + 96,38 L - 0,1118 L^2 \quad (8)$$

$$R^2 = 0,75$$

Em que:

$\hat{Y}$  = Produtividade da cultura em  $\text{kg ha}^{-1}$

$L$  = Lâmina de água, em  $\text{mm}$

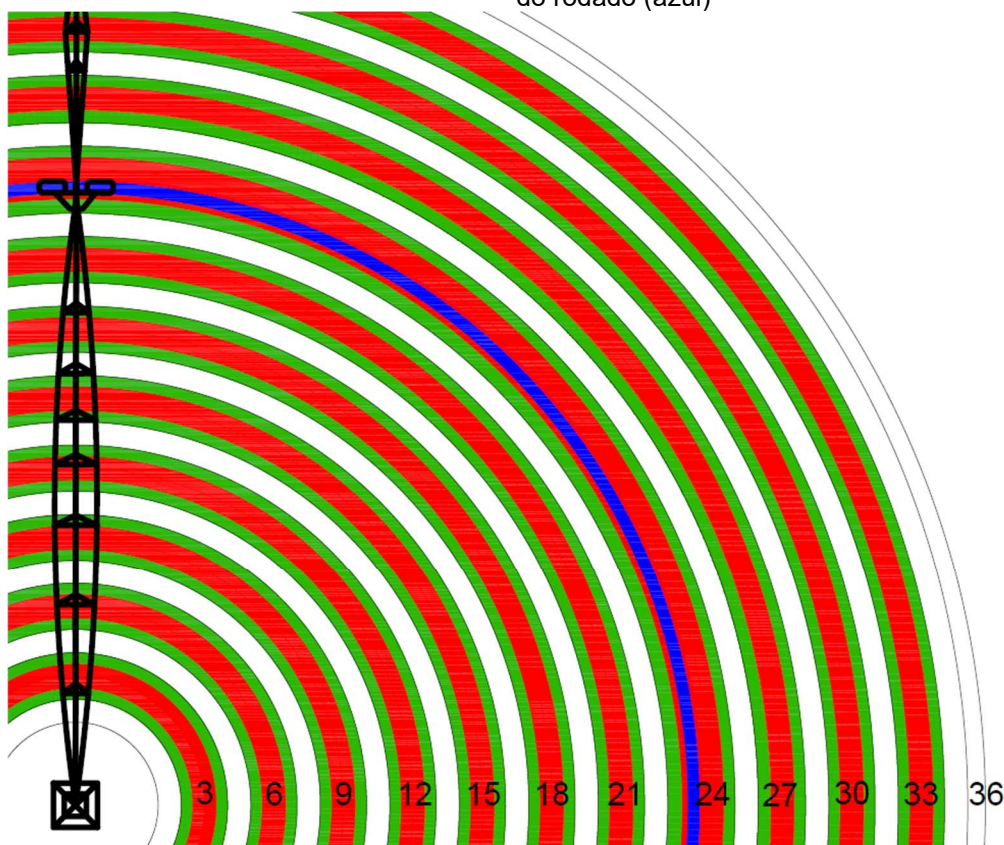
Para otimização e o processamento dos dados de produtividade, foi obtido o ponto de máximo com a lâmina ótima de 431,04  $\text{mm}$  ao longo da safra. Na parametrização, a relação entre produtividade e entupimento considerou as lâminas aplicadas em cada área de influência individual dos emissores experimentais, bem como as respectivas faixas molhadas. A única exceção foi o emissor experimental 36, uma vez que, por sua posição na extremidade do raio, não apresentou sobreposição suficiente para que a lâmina média estimada em sua área de influência pudesse ser obtida de forma representativa pelo procedimento de cálculo adotado para as demais unidades experimentais. Em um pivô central, cada emissor descreve uma circunferência concêntrica ao redor do ponto pivô, com raio correspondente à distância do emissor ao centro.

A área de influência de cada emissor foi definida como a área da coroa circular compreendida entre a circunferência do emissor imediatamente exterior (posterior) e a do emissor imediatamente interior, refletindo o espaçamento entre emissores ao longo do raio. Essa área foi utilizada para o cálculo da lâmina média aplicada na região

associada a cada emissor. Paralelamente, a faixa molhada foi definida como o intervalo radial delimitado pelos pontos médios dos segmentos que conectam o emissor aos seus dois vizinhos mais próximos ao longo do raio, estabelecendo a área específica para o cálculo da produtividade.

Dessa forma, foram consideradas duas áreas distintas: (i) a área de influência, empregada para determinar a lâmina aplicada; e (ii) a faixa molhada, utilizada para estimar a produtividade. Essa separação permitiu maior precisão na avaliação da relação entre o entupimento e a produção agrícola. A Figura 14 apresenta a disposição da área de influência e da faixa molhada, conforme desenho elaborado no *software* CAD (Computer-Aided Design).

Figura 14 – Disposição da área de influência (em verde), da faixa molhada (em vermelho) e traçado do rodado (azul)



Fonte: Autor

Os dados volumétricos dos coletores contidos nas áreas de influência dos emissores experimentais foram preservados para o cálculo da lâmina média aplicada em cada área. Para isso, utilizou-se a média agregada dos volumes coletados nas linhas A e B, posteriormente convertida em lâmina. Foram analisados tanto os

volumes dos testes de uniformidade com entupimento quanto os do teste médio de referência (sem entupimento). Com os valores das lâminas correspondentes aos cenários de entupimento, determinou-se a diferença de lâmina decorrente das condições de obstrução na área associada a cada emissor.

O tempo médio da safra de verão do milho é condicionado por variáveis climáticas e circunstanciais que influenciam o pleno desenvolvimento da cultura. O Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada (CEPEA) disponibiliza a cotação diária do milho por meio do índice ESALQ/BM&FBOVESPA, à vista, por saca de 60 kg, com desconto do prazo de pagamento pela taxa CDI/CETIP. A Tabela 4 apresenta as cotações da saca de 60 kg ao longo de 10 dias úteis (do final de outubro ao início de novembro), inseridas na safra de verão 2025/2026. Para a análise de produtividade, adotou-se a cotação de 06/11/2025, de R\$ 66,85 por saca, equivalente a R\$ 1,114 por quilograma (CEPEA, 2025).

Tabela 4 – Cotação do milho entre 28/10/2025 e 10/11/2025

Data	Cotação (R\$)	Cotação (US\$)
28/10/2025	65,84	12,28
29/10/2025	66,03	12,31
30/10/2025	66,24	12,32
31/10/2025	66,15	12,29
03/11/2025	66,43	12,40
04/11/2025	66,69	12,35
05/11/2025	66,80	12,46
<b>06/11/2025</b>	<b>66,85</b>	<b>12,50</b>
07/11/2025	67,08	12,57
10/11/2025	67,31	12,68

Fonte: CEPEA (2025)

Na Equação (8) é fornecida a produtividade da safra em função da lâmina aplicada ao longo de todo o ciclo. Contudo, as lâminas obtidas nos testes correspondem à aplicação de uma única volta do pivô. Diante disso, tornou-se necessário introduzir um coeficiente  $K$ , que representa o número de voltas do pivô ao longo da safra, de modo a: (i) fornecer a lâmina ótima ao cultivo no cenário de referência (sem entupimento) para cada área de influência; e (ii) ajustar as lâminas correspondentes aos cenários de entupimento, permitindo estimar a produtividade associada a cada condição.

Com a produtividade da safra estimada em função das lâminas com e sem entupimento para cada emissor, determinou-se a massa produzida em cada condição na faixa molhada correspondente. Para isso, utilizou-se a produtividade  $Y_i$  (em  $kg\ ha^{-1}$ ) e a área da faixa molhada  $S_i$  (em  $ha$ ), de modo que a massa  $M_i$  resultasse em  $kg$ , conforme a Equação (9). Dessa forma, a comparação entre condições de lâmina ótima e de lâmina sob entupimento foi realizada em termos de massa produzida ( $kg$ ), permitindo quantificar diretamente a perda de produção associada ao entupimento.

$$M_i = Y_i \cdot S_i \quad (9)$$

Em que:

$M$  = Massa produzida, em  $kg$ , na faixa molhada do emissor  $i$ ;

$Y$  = Produtividade da cultura, em  $kg\ ha^{-1}$ , na faixa molhada do emissor  $i$ ; e

$S$  = Área de faixa molhada, em  $ha$ .

A diferença entre as massas produzidas na condição de lâmina ótima e na condição de entupimento representa a perda de massa decorrente do entupimento dos emissores. A Equação (10) representa essa perda:

$$Perda_i = Mwc_i - Mc_i \quad (10)$$

Em que:

$Perda_i$  = Perda de massa, em  $kg$ , na faixa molhada do emissor  $i$ ;

$Mwc_i$  = Massa produzida na condição de ausência de entupimento, em  $kg\ ha^{-1}$ , na faixa molhada do emissor  $i$ ;

$Mc_i$  = Massa produzida na condição de entupimento, em  $kg\ ha^{-1}$ , na faixa molhada do emissor  $i$ ;

O prejuízo associado a cada emissor experimental foi estimado com base na perda de massa na respectiva faixa molhada e no preço do milho por quilograma ( $R\$ kg^{-1}$ ). Assim, para cada emissor  $i$ , o prejuízo individual foi obtido pelo produto  $Perda_i \times P$ , em que  $Perda_i$  é expresso em  $kg$  e  $P$  representa o preço unitário do

produto. Para representar o prejuízo total em um cenário de entupimento, foram somados os prejuízos individuais dos emissores presentes, conforme expresso na Equação (11).

$$Prejuízo = \sum_{i=1}^{11}(Perda_i) \quad (11)$$

Em que:

$Perda_i$  = Perda de massa, em *kg*, na faixa molhada do emissor *i*;

$Prejuízo$  = Prejuízo total, em *R\$*, para o cenário de entupimento.

#### 3.4.4.1 Avaliação dos cenários de entupimento na produtividade

Os cenários de entupimento processados nas etapas anteriores foram filtrados para excluir aqueles que continham o emissor 36, totalizando a combinatória de onze emissores, em vez dos doze considerados nas etapas iniciais. Essa filtragem resultou em 2.047 cenários de entupimento, cada um associado ao respectivo valor de CUC.

Para somar os prejuízos por emissor em cada cenário e interpretá-los, utilizou-se um gráfico de dispersão, relacionando coeficiente de uniformidade, prejuízo e quantidade de emissores entupidos. Para tanto, empregou-se programação em Python® nos ambientes Anaconda Spyder® e Google® Colaboratory. Foram utilizadas as bibliotecas os (interação com o sistema operacional), além do conjunto já citado: *pandas*, *itertools*, *matplotlib*, *seaborn*, *numpy* e *scipy*.

A dispersão entre prejuízos (perdas por cenário), Coeficiente de Uniformidade de Christiansen e o *overlay* em mapa de calor para identificar a quantidade de emissores entupidos por cenário permitiu interpretações relacionadas: (i) à relevância do número de emissores entupidos na degradação do CUC; (ii) à relação entre a quantidade de entupimentos e as perdas de produtividade; e (iii) à influência da disposição espacial dos emissores entupidos ao longo do raio do sistema.

Para verificar a existência de relação linear entre a quantidade de emissores entupidos e as perdas financeiras, aplicou-se análise por diagramas de caixa (*boxplots*) utilizando *pandas*, *matplotlib* e *seaborn*. Os cenários foram agrupados por número de emissores com entupimento e, para cada grupo, plotou-se a distribuição das perdas. Adicionou-se uma linha de tendência linear que conecta as medianas dos

grupos, permitindo visualizar possíveis relações diretas entre o aumento do número de emissores entupidos e a elevação das perdas medianas.

A análise buscou identificar se incrementos na quantidade de emissores entupidos corresponderam a aumentos proporcionais das perdas, ou se ocorreram padrões não lineares, efeitos de limiar ou de saturação capazes de alterar essa relação.

#### **3.4.4.2 Avaliação individual dos emissores na produtividade do milho**

Todos os cenários de entupimento foram analisados para identificar quais emissores problemáticos estavam presentes em cada caso. Para cada emissor, calcularam-se as médias dos parâmetros de desempenho (CUC e perda por cenário), considerando exclusivamente os cenários em que aquele emissor apresentava entupimento. Essas médias foram comparadas à média global dos cenários, permitindo avaliar o efeito médio associado a cada emissor.

Para avaliar a precisão das estimativas do CUC médio por emissor e complementar a estatística descritiva, utilizou-se o Erro Padrão da Média (SEM), sendo possível analisar não apenas os valores médios, mas também a consistência, confiabilidade e estabilidade dos resultados ao longo dos cenários.

Para combinar as métricas de desempenho em um único índice, aplicou-se normalização linear, transformando as variáveis em uma escala comum entre 0 e 1, com base no conjunto amostral. Para a perda média por emissor, utilizou-se normalização direta, na qual os valores mais elevados resultam em escores normalizados maiores. Para o CUC médio, adotou-se normalização invertida, uma vez que menores valores de CUC indicam pior desempenho, ao contrário do comportamento das perdas financeiras. Essa transformação garantiu que, em ambas as métricas, escores próximos de 1 indicassem a condição mais crítica do emissor. A transformação matemática aplicada às perdas é apresentada na Equação (12). Para a uniformidade, a inversão do parâmetro e a normalização são apresentadas, respectivamente, nas Equações (13) e (14). O score final de cada emissor foi calculado como média ponderada das duas métricas normalizadas, atribuindo-se pesos iguais (50%) a cada uma, de modo a considerar, com a mesma importância, os impactos na produtividade e na uniformidade.

$$PerdaN_i = \frac{Perda_i - Perda_{min}}{Perda_{max} - Perda_{min}} \quad (12)$$

Em que:

$PerdaN_i$  = Índice de perda normalizada para o emissor  $i$ , adimensional;

$Perda_i$  = Perda média para o emissor  $i$ , em R\$;

$Perda_{min}$  = Perda média do emissor menos crítico do parâmetro, em R\$ e

$Perda_{max}$  = Perda média do emissor mais crítico do parâmetro, em R\$.

$$CUC'_i = 100 - CUC_i \quad (13)$$

Em que:

$CUC'_i$  = Complemento percentual do Coeficiente de uniformidade de Christiansen para o emissor  $i$ , em %;

$CUC_i$  = Coeficiente de uniformidade de Christiansen para o emissor  $i$ , em R\$;

$$CUCN_i = \frac{CUC'_i - CUC'_{min}}{CUC'_{max} - CUC'_{min}} \quad (14)$$

Em que:

$CUCN_i$  = Coeficiente de Uniformidade de Christiansen normalizado para o emissor  $i$ , adimensional;

$CUC'_i$  = Complemento percentual invertido do Coeficiente de uniformidade de Christiansen para o emissor  $i$ , em %;

$CUC'_{min}$  = Complemento percentual do CUC médio do emissor mais crítico do parâmetro, em R\$; e

$CUC'_{max}$  = Complemento percentual do CUC médio do emissor menos crítico do parâmetro, em R\$.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Vazões

As médias das vazões amostrais foram comparadas às vazões nominais de catálogo com razão percentual e erro relativo ( $-100\% + Razão\ percentual$ ), conforme apresentado na Tabela 5, na qual também se encontra o mapeamento dos bocais do sistema. As medições indicaram vazão total do pivô de  $19,889\ m^3\ h^{-1}$ . A comparação entre as séries evidenciou que o primeiro terço do equipamento (do emissor 1 ao emissor 12) apresentou melhor aderência ao dimensionamento do projeto, quando comparado aos dois terços finais, registrando valores entre 92% e 100% da vazão nominal. Ainda nesse segmento, observou-se a ocorrência de três desvios, sendo o mais expressivo equivalente a 113% da vazão nominal.

Nos dois terços finais (do emissor 13 ao emissor 36), verificaram-se extrapolações das vazões nominais em 21 dos 24 emissores avaliados. Contudo, apenas três emissores apresentaram valores superiores a 110% da vazão de catálogo.

A extrapolação recorrente das vazões nominais constitui indicativo de desgaste avançado das válvulas reguladoras de pressão, possivelmente associado à elevada vida útil operacional do sistema, uma vez que tais componentes tendem a perder capacidade de controle ao longo do tempo de uso (ANDRADE et al., 2025).

Tabela 5 – Mapeamento de bocais com razão percentual e erro relativo entre vazões nominais e amostrais (Senninger UP3)

Emissor	Bocal Senninger UP3	Vazão ( $L\ s^{-1}$ )	Vazão ( $L\ h^{-1}$ )	Vazão Nominal ( $L\ h^{-1}$ )	Razão $Q_{amostral} \div Q_{Nominal}$ (%)	Erro Relativo (%)
1	N6	0,048	173,27	182	95,2	-4,8
2	N6	0,047	168,80	182	92,7	-7,3
3	N6	0,049	177,00	182	97,3	-2,7
4	N6	0,048	171,93	182	94,5	-5,5
5	N6	0,049	174,60	182	95,9	-4,1
6	N6,5	0,056	200,60	213	94,2	-5,8
7	N7	0,069	248,70	248	100,3	0,3
8	N7	0,068	245,30	248	98,9	-1,1
9	N7,5	0,090	323,40	286	113,1	13,1

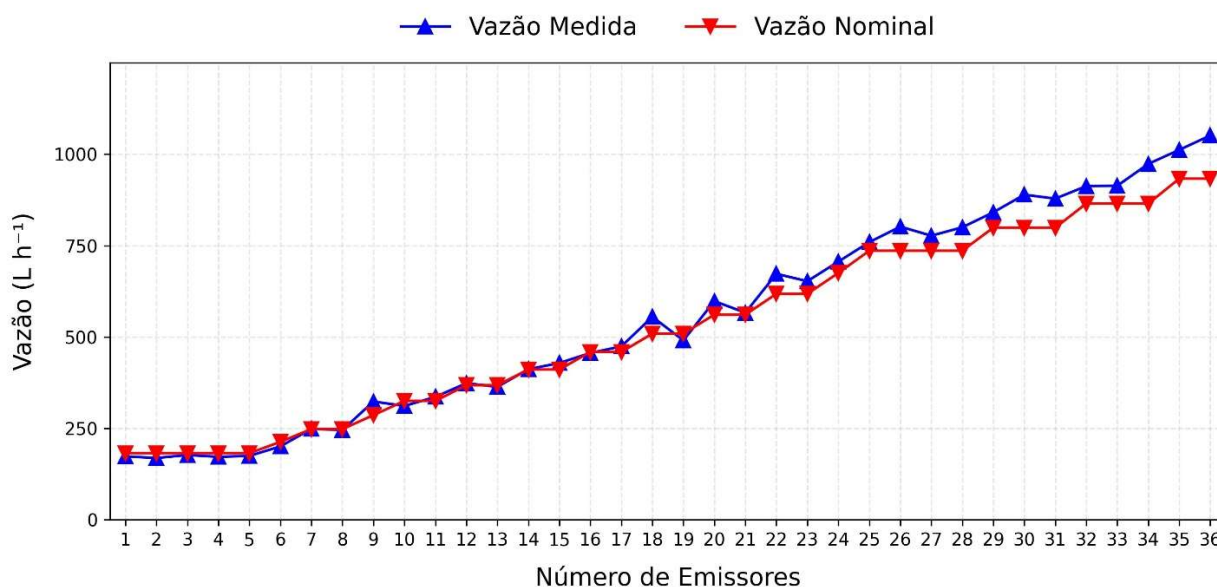
10	N8	0,086	311,20	325	95,8	-4,2
11	N8	0,093	336,10	325	103,4	3,4
12	N8,5	0,104	373,44	368	101,5	1,5
13	N8,5	0,101	363,42	368	98,8	-1,2
14	N9	0,114	411,84	411	100,2	0,2
15	N9	0,119	428,64	411	104,3	4,3
16	N9,5	0,127	456,12	459	99,4	-0,6
17	N9,5	0,132	474,12	459	103,3	3,3
18	N10	0,154	555,20	509	109,1	9,1
19	N10	0,136	490,40	509	96,3	-3,7
20	N10,5	0,166	598,00	561	106,6	6,6
21	N10,5	0,157	566,27	561	100,9	0,9
22	N11	0,187	672,75	618	108,9	8,9
23	N11	0,181	652,50	618	105,6	5,6
24	N11,5	0,196	706,11	675	104,6	4,6
25	N12	0,211	759,43	736	103,2	3,2
26	N12	0,223	801,77	736	108,9	8,9
27	N12	0,216	777,00	736	105,6	5,6
28	N12	0,222	800,00	736	108,7	8,7
29	N12,5	0,234	841,00	799	105,3	5,3
30	N12,5	0,247	889,20	799	111,3	11,3
31	N12,5	0,244	878,40	799	109,9	9,9
32	N13	0,254	912,72	865	105,5	5,5
33	N13	0,254	913,68	865	105,6	5,6
34	N13	0,270	973,44	865	112,5	12,5
35	N13,5	0,281	1011,84	933	108,5	8,5
36	N13,5	0,292	1051,20	933	112,7	12,7

Fonte: Senninger (2025)

A Figura 15 evidencia a tendência de aumento das vazões amostrais em relação às vazões nominais ao longo do raio do pivô, sugerindo comportamento compatível com desgaste progressivo dos reguladores de pressão. Observa-se que, a partir do emissor 22, os desvios tornam-se mais pronunciados em comparação com a primeira metade do sistema, indicando maior comprometimento hidráulico nesse trecho. Assim, para o desgaste das válvulas reguladoras, conclui-se que a vazão (quantidade de água) é um parâmetro mais relevante do que a pressão (esforço

suportado), tendo em vista que as válvulas mais distantes operam com menor pressão comparado com as mais próximas do centro do pivô.

Figura 15 – Diagrama de dispersão entre vazões nominais e amostrais



Fonte: Autor

## 4.2 Pressões

A Tabela 6 apresenta as leituras de pressão efetuadas nos emissores 1 e 36, a partir das quais se obteve uma perda de carga média de 1,407 *m. c. a.* ao longo do pivô com comprimento de 82,500 *m.* Esse resultado mostra-se coerente com os achados de Al-Ghobari (1995), que analisou a influência do coeficiente de atrito nas equações de Hazen–Williams e Darcy–Weisbach na determinação das perdas de carga em condutos com vazão em marcha. O autor demonstrou que a redução de pressão em linhas laterais com múltiplas saídas (em sistemas com 10 a 100 aspersores) é influenciada pelo comprimento da linha e pela distribuição de vazões ao longo do sistema, corroborando os valores observados experimentalmente entre o primeiro emissor e o trigésimo sexto emissor.

Tabela 6 – Leituras de pressão e perda de carga média no pivô

Amostra	Emissor	Pressão ( <i>m. c. a.</i> )
$P_1$	1	39,398
	36	37,991

$P_2$	1	37,991
	36	36,584
Perda de carga Média		1,407

Fonte: Autor

### 4.3 Diâmetro molhado

Os reguladores de pressão ajustados para 10 *psi* (aproximadamente 7 metros de coluna d'água), operando em conjunto com os emissores Senninger® I-Wob UP3 com defletor de 9 ranhuras, resultaram nos diâmetros molhados apresentados na Tabela 7 para os emissores experimentais. Os emissores 3 e 6 apresentaram diâmetros molhados abaixo do intervalo nominal na configuração avaliada. Ao relacionar esses resultados às vazões apresentadas na Tabela 5, observa-se que tais emissores também apresentaram vazões amostrais 2,7% e 5,8% abaixo da vazão nominal, respectivamente. Os demais emissores permaneceram enquadrados nos intervalos nominais indicados pelo fabricante. Considerando-se a instalação de duas linhas radiais de coletores, distanciadas em 3°, conforme estabelecido pela ABNT NBR ISO 11545:2016, as diferenças de altura dos emissores registradas em campo não exercem influência relevante sobre o cálculo do Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (HEINEMANN et al., 1998) nas condições metodológicas adotadas.

Tabela 7 – Altura e diâmetro molhado dos emissores experimentais

Emissor	Altura (m)	Altura (pés)	Diâmetro Molhado (m)	Intervalo Nominal (m) - 6 pés	Intervalo Nominal (m) - 9 pés
3	2,17	7,12	9,95	10,40 - 17,40	11,60 - 18,00
6	2,07	6,79	10,30	10,40 - 17,40	11,60 - 18,00
9	2,05	6,73	11,15	10,40 - 17,40	11,60 - 18,00
12	2,14	7,02	12,10	10,40 - 17,40	11,60 - 18,00
15	2,13	6,99	12,40	10,40 - 17,40	11,60 - 18,00
18	2,15	7,05	12,90	10,40 - 17,40	11,60 - 18,00
21	2,32	7,61	13,00	10,40 - 17,40	11,60 - 18,00
24	2,34	7,68	13,45	10,40 - 17,40	11,60 - 18,00
27	2,53	8,30	14,50	10,40 - 17,40	11,60 - 18,00
30	2,58	8,47	14,00	10,40 - 17,40	11,60 - 18,00
33	2,73	8,96	14,10	10,40 - 17,40	11,60 - 18,00
36	2,97	9,74	16,30	10,40 - 17,40	11,60 - 18,00

Fonte: Autor

#### 4.4 Condições meteorológicas

As condições meteorológicas durante os testes de uniformidade foram registradas com o anemômetro digital PeakMeter® PM625B, em conjunto com o aplicativo Bússola (versão 9.6.9.1.0). No município de Coimbra–MG, os sentidos predominantes de vento observados durante os ensaios foram Norte, Nordeste e Sul, que ocorreram em 12 dos 15 testes realizados. A Tabela 8 sintetiza os dados meteorológicos (temperatura do ar, umidade relativa, velocidade e direção do vento) associados a cada teste, conforme o respectivo código.

Tabela 8 – Dados meteorológicos durante os testes de avaliação da uniformidade de aplicação de água

<b>Código do Teste</b>	<b>Data</b>	<b>Temperatura média (°C)</b>	<b>Umidade relativa (%)</b>	<b>Velocidade do vento (<math>m s^{-1}</math>)</b>	<b>Azimute</b>
CUC QT 1	05/05/2025	23,3	62,6	2,45	N - 10°
CUC QT 2	06/05/2025	23,1	68,7	1,00	S - 172 °
CUC QT 3	06/05/2025	25,8	55,0	1,25	N - 1°
CUC Q0 E03	07/05/2025	30,4	47,8	5,00	S - 175°
CUC Q0 E06	08/05/2025	23,0	69,5	1,40	SO - 230°
CUC Q0 E09	08/05/2025	26,4	63,5	4,20	N - 352°
CUC Q0 E12	09/05/2025	26,9	56,8	6,00	S - 172°
CUC Q0 E15	12/05/2025	23,0	63,2	6,00	NE - 60°
CUC Q0 E18	13/05/2025	19,9	74,0	4,00	N - 351°
CUC Q0 E21	13/05/2025	24,8	58,0	2,50	NE - 30°
CUC Q0 E24	15/05/2025	18,0	78,5	4,00	NE - 24°
CUC Q0 E27	16/05/2025	20,4	67,5	0,50	S - 194°
CUC Q0 E30	16/05/2025	24,1	61,0	6,00	L - 74°
CUC Q0 E33	16/05/2025	27,9	45,0	5,00	NE - 40°
CUC Q0 E36	19/05/2025	23,2	60,9	6,00	SO - 212°

Fonte: Autor

#### 4.5 Teste de uniformidade conforme ABNT

A Tabela 9 apresenta os valores de CUC obtidos em todos os testes realizados, incluindo os três ensaios sem simulação de entupimento. A correção de evaporação prevista pela ABNT (2016) promoveu aumento das lâminas estimadas nos coletores e, conseqüentemente, afetou os valores corrigidos. Em geral, dias e horários com temperaturas mais elevadas resultaram em correções maiores, em razão do aumento

das perdas por evaporação, o que se reflete em acréscimos mais expressivos na uniformidade corrigida.

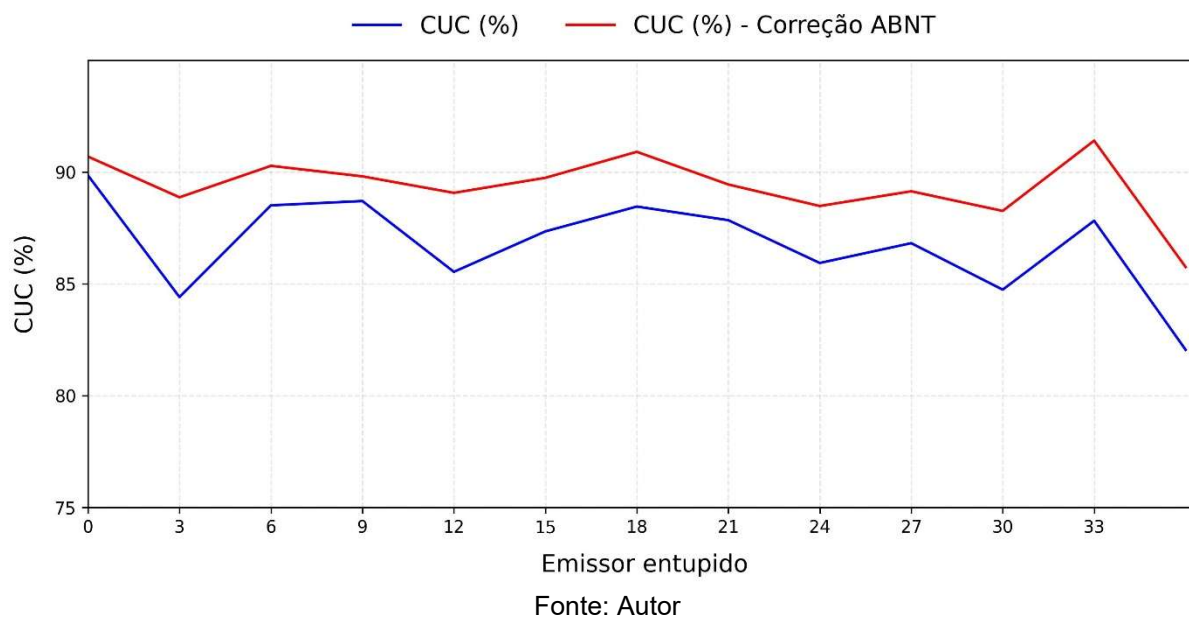
Tabela 9 – CUC observado e CUC corrigido por evaporação (ABNT, 2016)

<b>Código Teste</b>	<b>CUC Observado (%)</b>	<b>CUC Corrigido (%)</b>
CUC QT 1	90,255	90,683
CUC QT 2	89,554	90,216
CUC QT 3	89,748	91,185
CUC Q0 E03	84,411	88,874
CUC Q0 E06	88,514	90,281
CUC Q0 E09	88,707	89,811
CUC Q0 E12	85,541	89,073
CUC Q0 E15	87,350	89,746
CUC Q0 E18	88,461	90,909
CUC Q0 E21	87,851	89,448
CUC Q0 E24	85,936	88,485
CUC Q0 E27	86,822	89,144
CUC Q0 E30	84,743	88,264
CUC Q0 E33	87,826	91,408
CUC Q0 E36	82,053	85,756

Fonte: Autor

A Figura 16 apresenta as variações do CUC, considerando, no eixo das abscissas, um “emissor zero” para representar os três testes sem entupimento. Assim, o valor correspondente no eixo das ordenadas representa a média do CUC dos ensaios de referência (sem entupimento), permitindo comparação direta com os cenários com obstrução.

Figura 16 – Variações do CUC (%) com e sem correção de evaporação segundo ABNT (2016)



#### 4.6 Relação vento e CUC

A velocidade do vento é um dos principais parâmetros a serem considerados durante testes de uniformidade de Christiansen. A ABNT (2016) recomenda a realização desses ensaios preferencialmente ao amanhecer, em função da tendência de menor incidência de ventos. Em sistemas de aspersão, o impacto do vento está associado sobretudo às perdas por deriva, que podem provocar distorções no padrão de deposição de água e, conseqüentemente, reduzir o CUC; em geral, maiores velocidades tendem a reduzir a uniformidade observada (DECHMI et al., 2003).

No caso de pivôs centrais, entretanto, a interpretação do efeito do vento requer considerar não apenas a velocidade, mas também a direção do vento e a própria dinâmica de deslocamento do equipamento. Kincaid (1996), Ouzaa et al. (2015) e Faria et al. (2016) destacam que parâmetros relacionados ao movimento do sistema influenciam o padrão de aplicação, incluindo a direção e a velocidade de deslocamento, além de variações induzidas por patinagens ou trepidações (CHÁVEZ et al., 2010). Sanchez et al., (2011), reforçam a importância de incorporar variáveis de vento nas decisões de manejo na irrigação por aspersão. A Tabela 10 apresenta, para cada teste, o maior valor de velocidade registrado, bem como o curso do vento (azimute) e o sentido cardinal correspondente nos ensaios sem correção.

Tabela 10 – Registros de velocidade e sentido vento durante os testes.

<b>Código Teste</b>	<b>CUC (%)</b>	<b>Velocidade do vento (m/s)</b>	<b>Azimute</b>
CUC QT 1	90,255	2,45	N - 10°
CUC QT 2	89,554	1,00	S - 172 °
CUC QT 3	89,748	1,25	N - 1°
CUC Q0 E03	84,411	5,00	S - 175°
CUC Q0 E06	88,514	1,40	SO - 230°
CUC Q0 E09	88,707	4,20	N - 352°
CUC Q0 E12	85,541	6,00	S - 172°
CUC Q0 E15	87,350	6,00	NE - 60°
CUC Q0 E18	88,461	4,00	N - 351°
CUC Q0 E21	87,851	2,50	NE - 30°
CUC Q0 E24	85,936	4,00	NE - 24°
CUC Q0 E27	86,822	0,50	S - 194°
CUC Q0 E30	84,743	6,00	L - 74°
CUC Q0 E33	87,826	5,00	NE - 40°
CUC Q0 E36	82,053	6,00	SO - 212°

Fonte: Autor

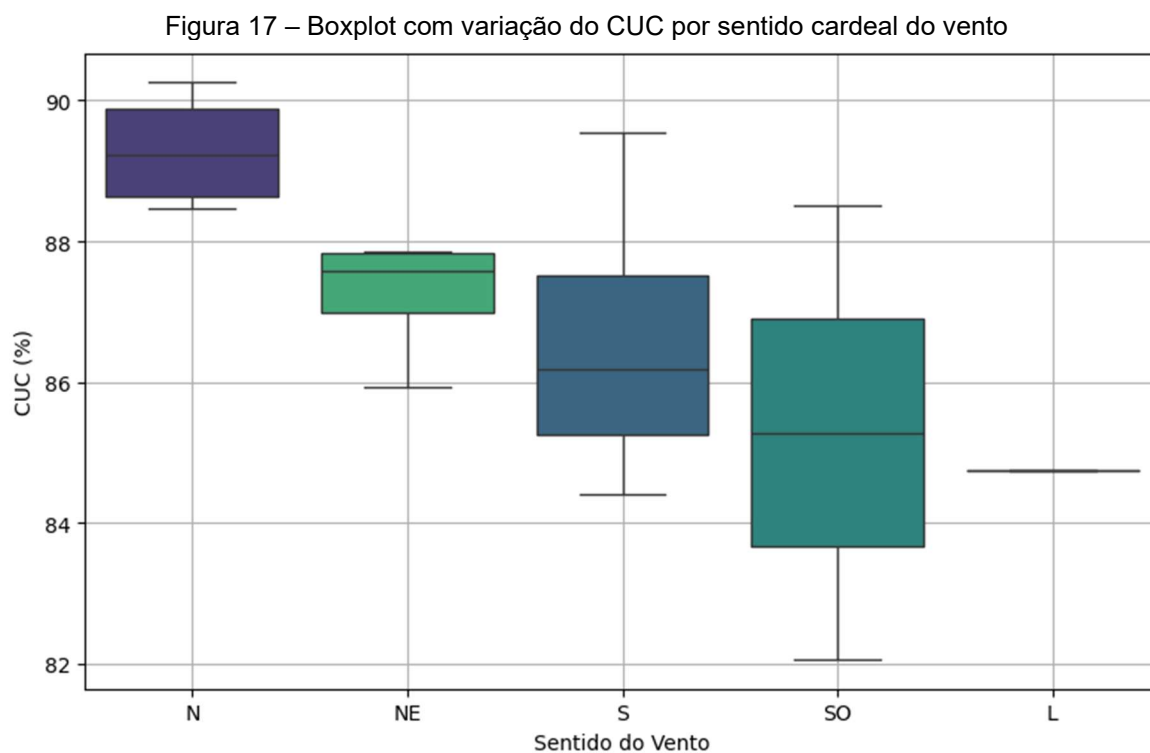
A disposição radial dos coletores, com o coletor 157 de ambas as linhas posicionado ao norte do centro do pivô, introduz uma particularidade experimental que pode distorcer a relação simplificada de que maiores velocidades de vento levam necessariamente à redução substancial da uniformidade. Nos testes com vento predominante de curso norte, observaram-se valores de CUC mais elevados, além de menor dispersão. Ao isolar os testes sem entupimento sob curso norte (CUC QT 1 e CUC QT 3), não se verificou redução sistemática do CUC com o aumento da velocidade do vento.

Os ventos de curso sul apresentaram menor distorção na relação entre a velocidade e a redução da uniformidade. Ainda assim, é essencial considerar que o cenário de entupimento aplicado e a relevância hidráulica de cada emissor no cálculo ponderado do CUC afetam o resultado final. Em particular, quanto maior a distância do emissor em relação ao centro do pivô, maior é sua contribuição ponderada para a uniformidade, em razão da maior área representada por essas posições.

Os ventos de curso nordeste apresentaram a menor dispersão nos valores de uniformidade, enquanto o vento de leste ocorreu em apenas um teste. A Figura 17 apresenta a distribuição dos valores de CUC em função do sentido cardinal do vento.

A configuração experimental posicionou os coletores no setor norte do pivô central, enquanto o sistema se deslocava no sentido horário, tendo o norte geográfico como referência de azimute 0°. Tais circunstâncias favoreceram que ventos em sentido Norte ou Nordeste conduziam as lâminas de deriva para os coletores mais afastados do centro do pivô, representando aumento do volume de água nos coletores com maior relevância na ponderação, segundo Heermann e Hein (1968).

Além disso, os coletores finais recebem deriva minutos antes do sistema alcançar o perímetro das linhas de coletores. Como esses coletores têm maior peso na lâmina média ponderada, aumentos de volume nessa região reduzem o desvio relativo em relação à lâmina média do teste, favorecendo o aumento do CUC. Tal condição justifica CUC apresentar baixa variabilidade entre os cenários avaliados para os sentidos norte e nordeste, evidenciada pela pequena amplitude dos intervalos interquartis.



Fonte: Autor

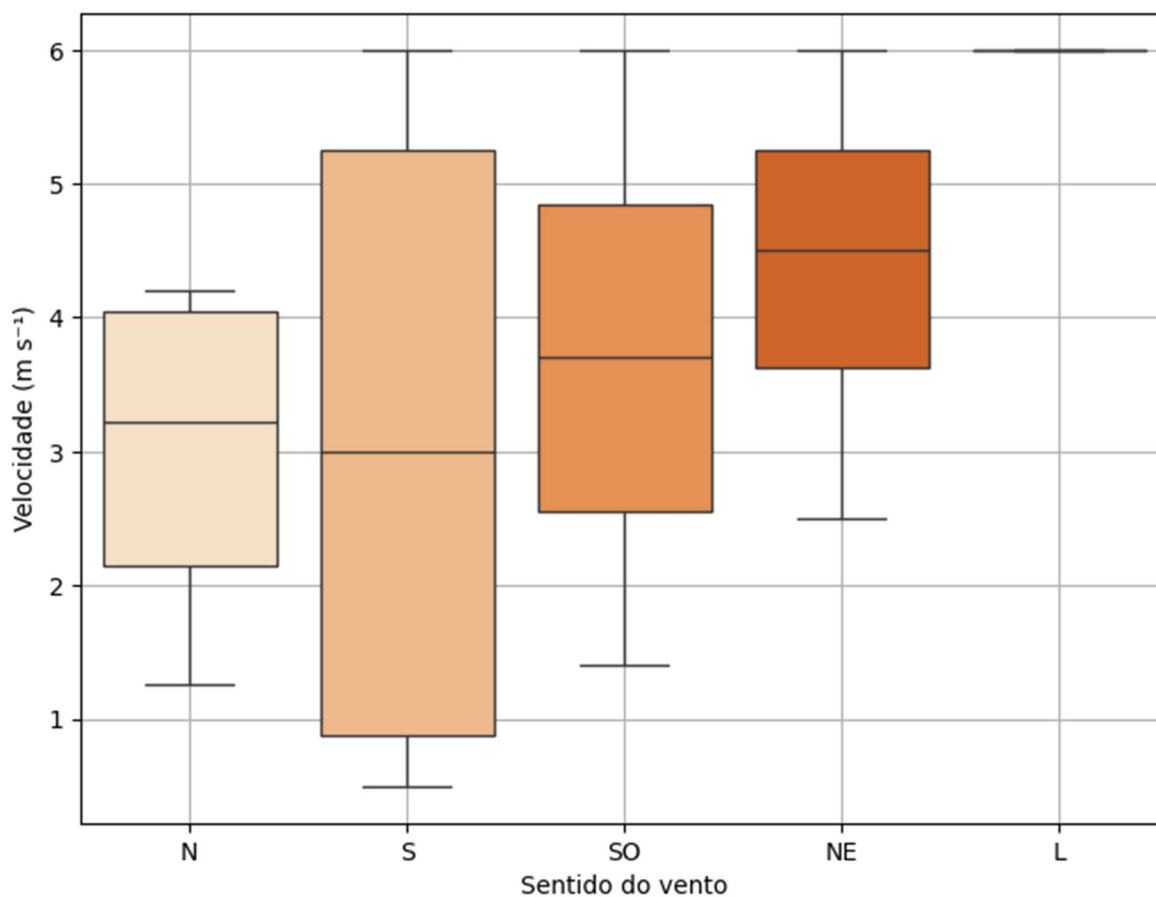
De modo complementar, ventos de curso sudoeste tendem a se opor ao sentido de deslocamento do pivô durante a aproximação das linhas de coletores. Nesse caso, a deriva pode lançar gotas para fora do perímetro de coleta antes que o pivô atinja a área dos coletores, reduzindo a deposição nas extremidades. Quando o sistema atravessa e ultrapassa o perímetro de coletores, a deriva passa a atuar no sentido do

centro do pivô, favorecendo os coletores de menor peso na ponderação. Assim, os coletores mais distantes do centro podem receber menores lâminas (ocorrência comum ao sentido sul), o que aumenta o desvio em relação à lâmina média ponderada e reduz a uniformidade estimada, provocando maior dispersão dos valores do CUC. A variabilidade nos sentidos sul e sudeste indica maior sensibilidade da uniformidade de distribuição à influência do vento nesses sentidos.

Para todos os sentidos avaliados, não foram identificados valores discrepantes nos conjuntos de dados, indicando comportamento homogêneo dos resultados obtidos. Vale ressaltar que, em virtude da ocorrência pontual de ventos em sentido leste, não há variabilidade aparente.

A Figura 18 apresenta a distribuição das velocidades registradas por sentido do vento. Entre as direções mais frequentes, o nordeste apresentou a maior mediana de velocidade, seguido pelo sudoeste, norte e sul. Observa-se ainda que a direção sul apresenta maior amplitude do intervalo interquartil e maior extensão dos limites do boxplot, evidenciando elevada dispersão das velocidades registradas nesse sentido.

Figura 18 – Boxplot de distribuição da velocidade em função do sentido do vento



Fonte: Autor

Por outro lado, os sentidos norte e nordeste apresentaram caixas mais estreitas, indicando menor variabilidade e maior concentração dos valores de velocidade nessas direções. De forma análoga ao observado para o CUC, não foram identificados valores discrepantes nas distribuições de velocidade do vento, sugerindo comportamento relativamente homogêneo dos dados analisados.

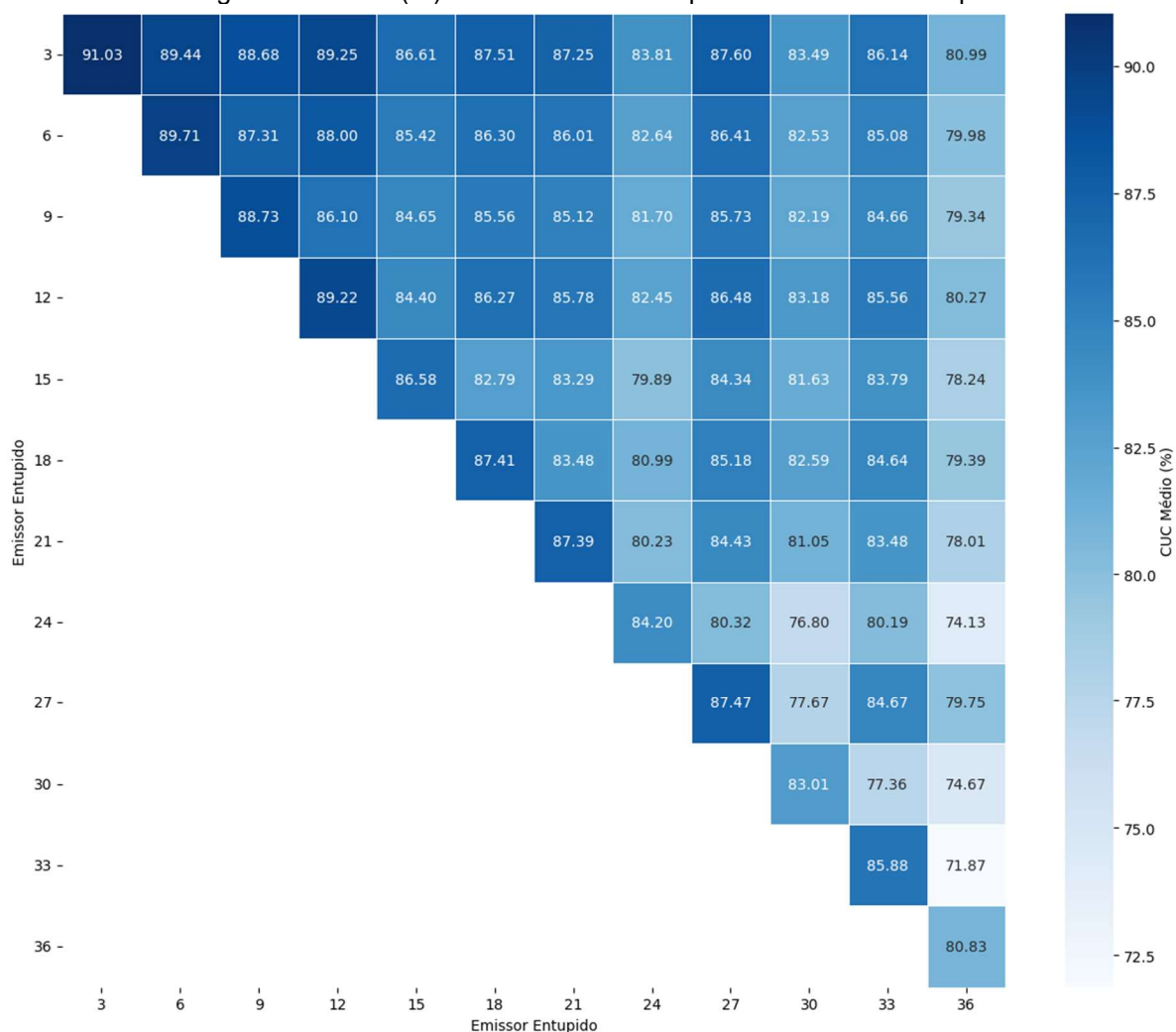
As Figuras 17 e 18 evidenciam que a relação entre o CUC e a velocidade do vento é fortemente condicionada pelo sentido do vento, uma vez que as variabilidades observadas indicam direções nas quais o CUC se mostrou mais sensível à ação do vento e outras nas quais os valores de uniformidade se aproximaram mais das condições hidráulicas esperadas de distribuição. Ao se observar o comportamento sob ventos no sentido nordeste, considerando a disposição das linhas de coletores adotadas nos ensaios, nota-se um contraponto: embora esse sentido tenha apresentado a maior mediana de velocidade, não resultou nos menores valores de uniformidade. Essa ocorrência sugere que, nas condições experimentais adotadas, o sentido do vento pode exercer influência mais determinante sobre o CUC do que a velocidade isoladamente.

Em contrapartida, o curso norte apresentou uma das menores medianas de velocidade e, simultaneamente, a maior mediana de uniformidade de distribuição de água, indicando um comportamento menos aderente à tendência reportada por Dechmi et al. (2003) para a configuração específica deste ensaio.

#### **4.7. Simulações**

O encadeamento de volumes empregado na construção dos 4.096 cenários e o cálculo do CUC e da lâmina média foram analisados individualmente, em duplas e por meio de agrupamentos qualitativos a partir dos trios de entupimento, com base na posição dos emissores ao longo do raio. Os doze emissores experimentais foram organizados em FRs, e os cenários foram identificados com base na similaridade quantitativa na combinação dessas faixas. A Figura 19 apresenta valores de uniformidade para cenários individuais e para cenários com entupimento duplo.

Figura 19 – CUC (%) em cenários de entupimento individual e duplo



Fonte: Autor

Nos cenários individuais, os emissores que apresentaram os menores valores de uniformidade foram: emissor 24 (84,20%), emissor 30 (83,01%) e emissor 36 (80,83%). Nos cenários com entupimento duplo, as combinações que contêm os emissores 24, 30 e 36 também apresentaram os menores valores de CUC. A primeira justificativa relaciona-se às condições de vento durante os testes correspondentes: para os emissores 24, 30 e 36, registraram-se, respectivamente,  $4 \text{ m s}^{-1}$  (NE),  $6 \text{ m s}^{-1}$  (L) e  $6 \text{ m s}^{-1}$  (SO).

A segunda justificativa está associada ao caráter ponderado do CUC em pivôs centrais, no qual emissores mais distantes do centro do pivô representam maior área irrigada e, portanto, exercem maior influência no valor final da uniformidade. Assim, apesar da existência de desvios pontuais, observa-se uma tendência de redução da uniformidade com o aumento da distância dos emissores impactados em relação ao centro do pivô.

A terceira justificativa, particularmente para o emissor 24, refere-se à sua posição em relação à região de rodado, na qual ocorre um espaçamento aproximadamente duas vezes maior do que o padrão do sistema, em relação ao emissor 23, além da interferência estrutural associada à torre. Essas condições reduziram a sobreposição esperada do padrão de aplicação e aumentaram a variabilidade das lâminas, resultando em redução da uniformidade (KELLER; BLIESNER, 1990).

Nos cenários de entupimento duplo, a participação dos emissores 24, 30 e 36 também contribuiu para a redução das médias, quando comparadas às demais duplas de entupimento. A partir dos cenários com três emissores entupidos, as combinações passaram a ser analisadas por meio do agrupamento das quatro FRs, avaliando-se o CUC conforme o padrão de posicionamento dos entupimentos ao longo do raio. Cenários com o mesmo padrão de posicionamento foram reunidos e analisados por meio do cálculo da média representativa do CUC para cada padrão.

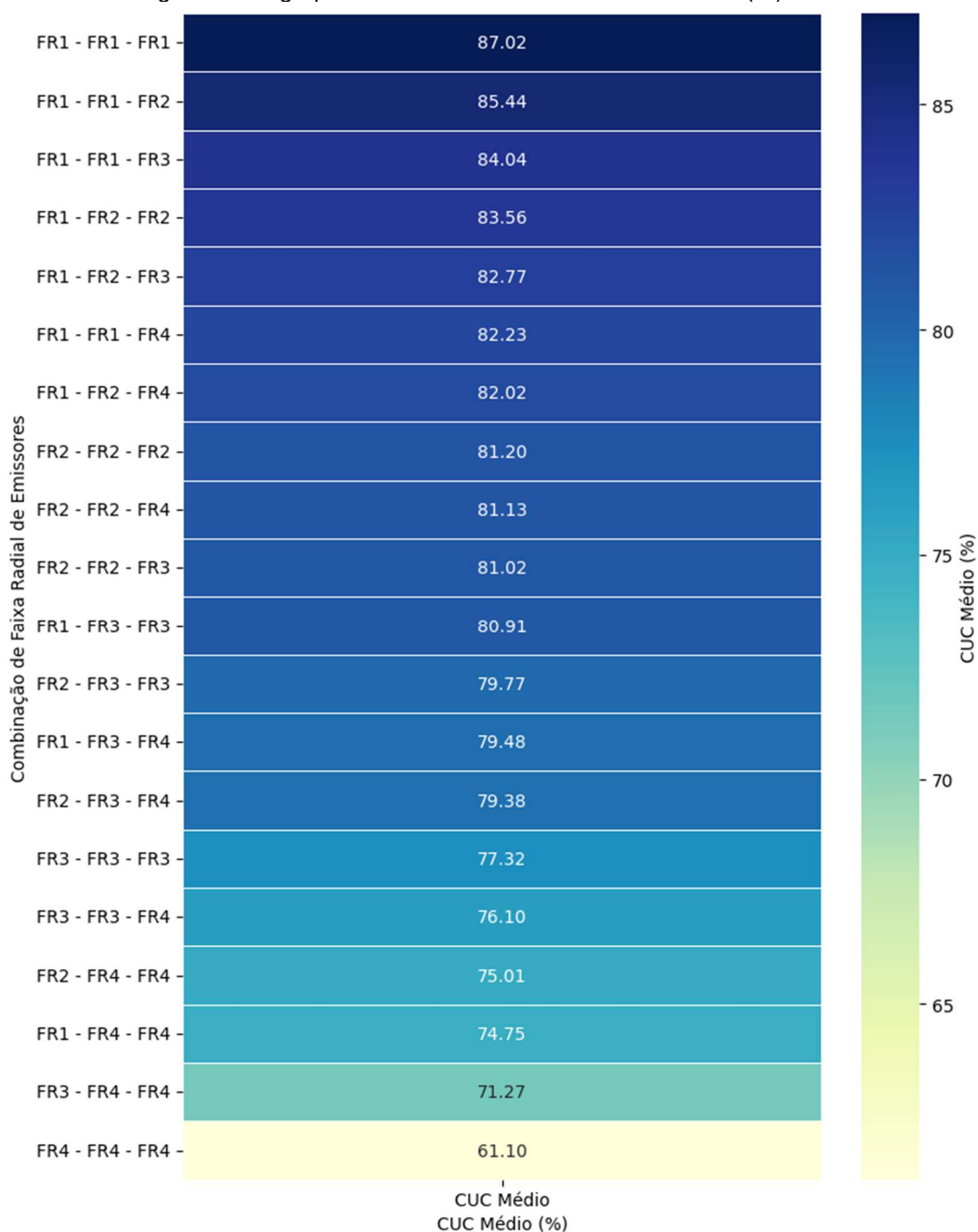
#### **4.7.1 Influência das FRs na uniformidade sob entupimento**

Para compreender o efeito do entupimento sobre a uniformidade em cenários com três ou mais emissores obstruídos, agruparam-se combinações semelhantes de FRs em cenários de entupimento, criando conjuntos. Para cada conjunto, calculou-se o valor médio do CUC.

##### **4.7.1.1 Trios entupidos**

Nos cenários com entupimento em trios, o maior valor médio de uniformidade foi observado quando os três emissores pertenciam à primeira FR, resultando em CUC de 87,02%. Esse valor corresponde à segunda melhor classificação operacional tanto segundo Mantovani (2001) quanto segundo a ABNT (2016). A Figura 20 apresenta o *heatmap* das médias dos agrupamentos combinatórios.

Figura 20 – Agrupamentos combinatórios em trios e CUC (%) médio



Fonte: Autor

A Tabela 11 apresenta a frequência de ocorrência de FRs por classe de uniformidade, conforme Mantovani (2001) e a ABNT (2016). Considerando a classe “Bom” (Mantovani, 2001), observa-se maior presença de emissores da FR 1 (13 combinações), seguida da FR 2 (12 combinações). Em menor frequência, as faixas mais distantes do centro (3 e 4) estiveram presentes em 5 e 3 combinações, respectivamente.

Para a classe “Razoável”, as maiores frequências ocorreram nas FRs 3 e 4. Além disso, o cenário classificado como “Ruim” apresentou exclusivamente emissores da FR 4. Ao considerar a classificação da ABNT (2016), verifica-se que as categorias de melhor desempenho (“Boa” e “Regular”) tendem a concentrar emissores mais próximos do centro do pivô, enquanto a categoria “Ruim” apresenta maior frequência de emissores posicionados na segunda metade do raio.

Esses resultados são coerentes com as considerações de Heermann e Hein (1968) e de Bernardo et al. (2019), uma vez que emissores localizados nas extremidades representam maior área irrigada e, por isso, exercem maior influência ponderada no cálculo do CUC.

Tabela 11 – Frequência de grupos de emissores por FR, em função das classificações de uniformidade (Mantovani, 2001; ABNT, 2016), para entupimentos em trios

	<b>Classificação do CUC (%) Mantovani (2001)</b>				
	<b>Excelente (&gt;=90)</b>	<b>Bom (&gt;=80)</b>	<b>Razoável (&gt;=70)</b>	<b>Ruim (&gt;=60)</b>	<b>Péssimo (&lt;60)</b>
<b>FR1</b>	0	13	2	0	0
<b>FR2</b>	0	12	3	0	0
<b>FR3</b>	0	5	10	0	0
<b>FR4</b>	0	3	9	3	0

	<b>Classificação do CUC (%) ABNT (2016)</b>			
	<b>Muito Boa (&gt;=90)</b>	<b>Boa (&gt;=85)</b>	<b>Regular (&gt;=80)</b>	<b>Ruim (&lt;80)</b>
<b>FR1</b>	0	5	8	2
<b>FR2</b>	0	1	11	3
<b>FR3</b>	0	0	5	10
<b>FR4</b>	0	0	3	12

Fonte: Autor

#### 4.7.1.2 Quartetos entupidos

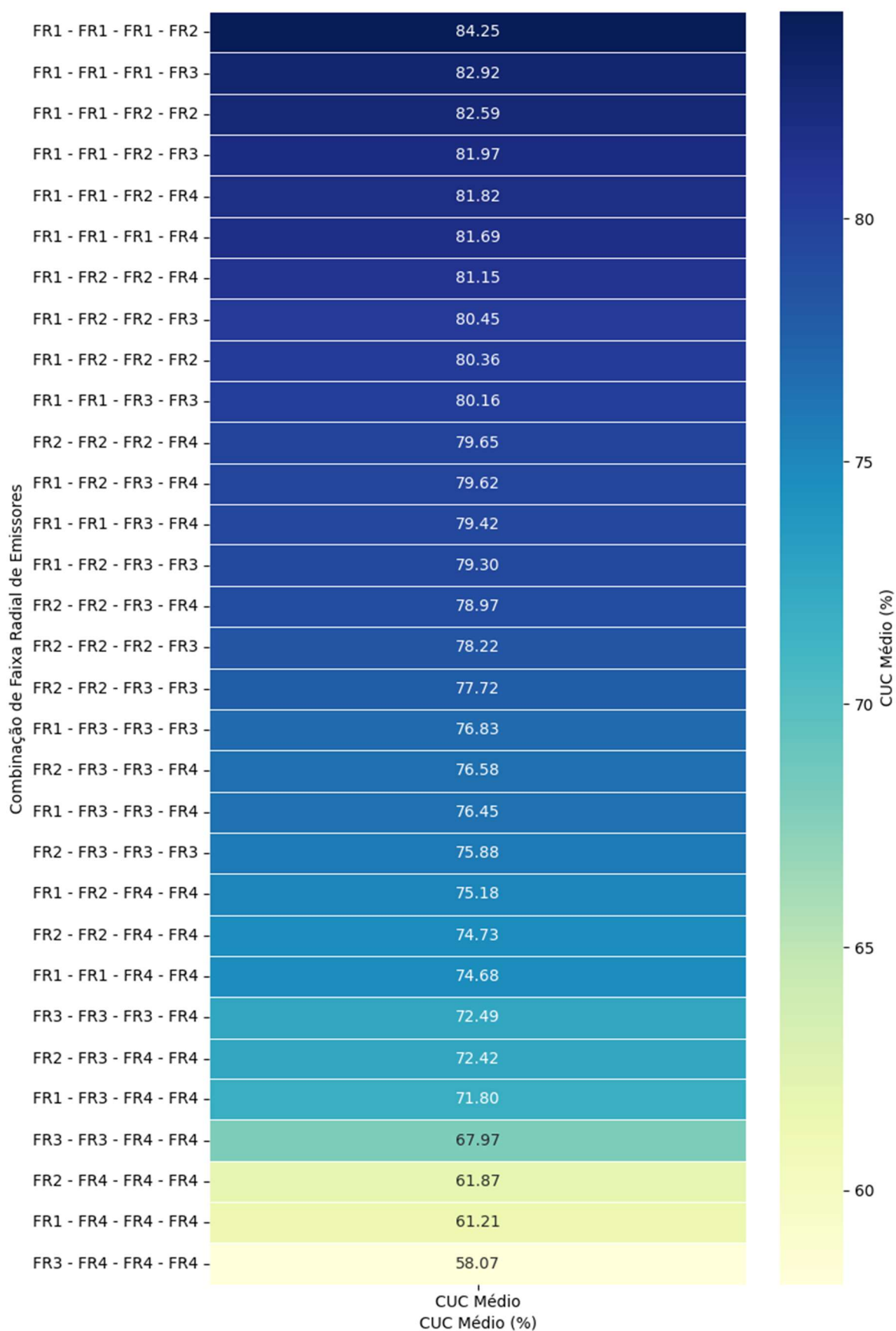
Para os cenários com quatro emissores entupidos, a maior uniformidade ocorreu quando os três emissores da FR 1 estavam entupidos em conjunto com qualquer um dos emissores da FR 2, resultando em CUC médio de 84,25%. A segunda maior uniformidade (82,92%) manteve a participação integral da FR 1, porém substituiu o emissor da FR 2 por um da FR 3, evidenciando que a inclusão de emissores mais distantes do centro tende a intensificar a degradação do CUC.

Em contraste, as três menores médias de uniformidade (67,97%, 61,87% e 58,07%) apresentaram, como característica comum, a presença integral da FR 4,

indicando que o entupimento concentrado na extremidade do raio impõe maior impacto na uniformidade, em consonância com a ponderação de área do método adaptado por Heermann e Hein (1968). A Figura 21 apresenta o conjunto completo das combinações de FRs em cenários de quartetos, juntamente com os respectivos valores médios de CUC.

Ao comparar os cenários em que a FR 3 está integralmente presente, observa-se que não há distorções relevantes na tendência quando se alterna a presença das FRs 1 e 2: permanece evidente o decréscimo da uniformidade à medida que aumenta a participação das FRs mais afastadas do centro do pivô, indicando que o posicionamento radial dos emissores entupidos é determinante para a magnitude da redução do CUC.

Figura 21 – Relação de agrupamentos combinatórios em quartetos e CUC (%) médio



Fonte: Autor

A distribuição de frequências apresentada na Tabela 12 reforça essa interpretação. Para os quartetos classificados como “Bom” por Mantovani (2001), observam-se 20 aparições de emissores da FR 1, 12 da FR 2, 5 da FR 3 e apenas 3 da FR 4. Essa mesma distribuição se repete na classe “Regular” segundo a ABNT (2016), uma vez que ambas as classificações coincidem nesse intervalo de CUC.

Para as classes de menor desempenho, Mantovani (2001) subdivide os cenários em “Razoável”, “Ruim” e “Péssimo”, e em todas essas categorias verifica-se maior frequência relativa de emissores das FRs 3 e 4. Na ABNT (2016), essas condições são agregadas predominantemente na categoria “Ruim”, mantendo o mesmo padrão: a maior participação das faixas localizadas na segunda metade do pivô evidencia a relevância dos emissores periféricos na degradação do CUC, especialmente em função da maior área correspondente às extremidades.

Tabela 12 – Frequência de grupos de emissores por FR, em função das classificações de uniformidade (Mantovani, 2001; ABNT, 2016), para entupimentos em quartetos

	<b>Classificação do CUC (%) Mantovani (2001)</b>				
	<b>Excelente (&gt;=90)</b>	<b>Bom (&gt;=80)</b>	<b>Razoável (&gt;=70)</b>	<b>Ruim (&gt;=60)</b>	<b>Péssimo (&lt;60)</b>
<b>FR1</b>	0	20	10	1	0
<b>FR2</b>	0	12	18	1	0
<b>FR3</b>	0	5	23	2	1
<b>FR4</b>	0	3	17	8	3

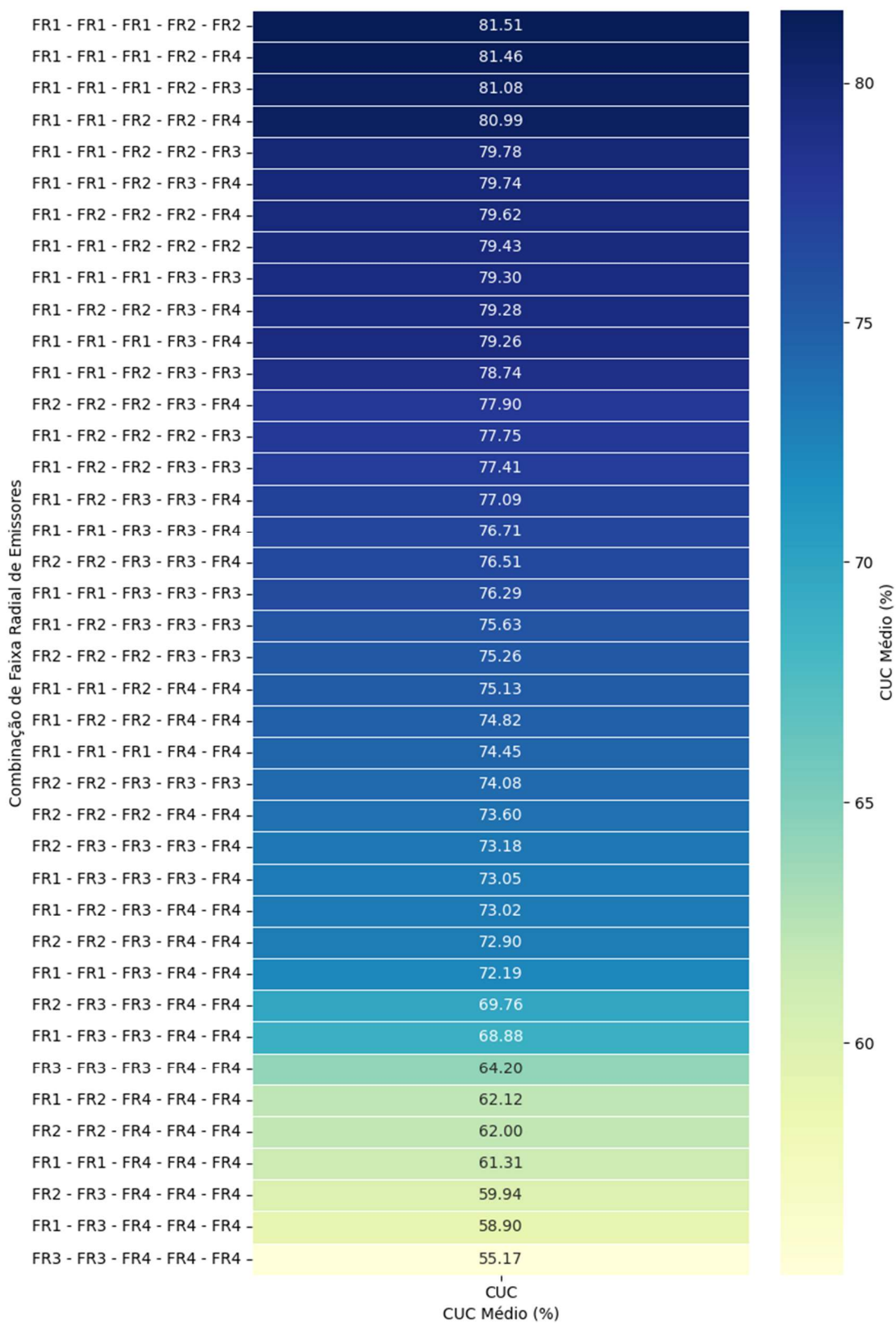
	<b>Classificação do CUC (%) ABNT (2016)</b>			
	<b>Muito Boa (&gt;=90)</b>	<b>Boa (&gt;=85)</b>	<b>Regular (&gt;=80)</b>	<b>Ruim (&lt;80)</b>
<b>FR1</b>	0	0	20	11
<b>FR2</b>	0	0	12	19
<b>FR3</b>	0	0	5	26
<b>FR4</b>	0	0	3	28

Fonte: Autor

#### 4.7.1.3 Quintetos entupidos

Conforme apresentado na Figura 22, a maior uniformidade nos cenários com cinco emissores entupidos ocorreu quando todos os emissores da FR 1 estavam entupidos, em conjunto com pelo menos dois emissores da FR 2, resultando em CUC médio de 81,51%. Em sentido oposto, a menor uniformidade (55,17%) foi registrada quando o entupimento abrangeu todos os emissores da FR 4 e, adicionalmente, pelo menos dois emissores da FR 3, evidenciando a acentuação do impacto negativo quando o entupimento se concentra nas faixas mais distantes do centro.

Figura 22 – Relação de agrupamentos combinatórios em quintetos e CUC (%) médio



Fonte: Autor

A Tabela 13 sintetiza as frequências e mostra que, entre as combinações com  $CUC \geq 80\%$  — classificadas como “Bom” por Mantovani (2001) e “Regular” pela ABNT (2016) — há predominância de entupimentos na primeira metade do pivô: registram-se 11 aparições da FR 1 e 6 da FR 2, enquanto a segunda metade participa com apenas 3 ocorrências somadas. Esses resultados indicam maior “tolerância” relativa do sistema quando o entupimento se concentra nas faixas iniciais, nas quais a ponderação de área é menor.

Nos quintetos, torna-se mais evidente a intensificação da degradação do CUC, com grande parcela das combinações apresentando uniformidade  $\leq 70\%$ . Nessa faixa, Mantovani (2001) ainda classifica numerosos cenários como “Razoável”, enquanto a ABNT (2016) os enquadra como “Ruim”, evidenciando maior rigor normativo na interpretação operacional do desempenho do sistema.

Pela classificação de Mantovani (2001), a classe “Razoável” apresenta distribuição relativamente equilibrada entre as FRs, ao passo que as classes inferiores (“Ruim” e “Péssimo”) mostram tendência clara de maior frequência de entupimentos na segunda metade do pivô. Em contrapartida, a ABNT (2016), ao consolidar as três classes inferiores de Mantovani na classe “Ruim”, resulta em uma distribuição mais homogênea nessa classe, reduzindo a capacidade de discriminar níveis intermediários de degradação.

A partir da análise dos quintetos, fica evidenciada a diferença de rigor entre os critérios: Mantovani (2001) ainda admite como razoáveis cenários com uniformidade já bastante comprometida, enquanto a ABNT (2016) conduz à condenação operacional do desempenho do sistema sob os mesmos padrões de entupimento, por enquadrá-los na classe “Ruim”.

Tabela 13 – Frequência de grupos de emissores por FR, em função das classificações de uniformidade (Mantovani, 2001; ABNT, 2016), para entupimentos em quintetos

<b>Classificação do CUC (%) Mantovani (2001)</b>					
	<b>Excelente (≥90)</b>	<b>Bom (≥80)</b>	<b>Razoável (≥70)</b>	<b>Ruim (≥60)</b>	<b>Péssimo (&lt;60)</b>
<b>FR1</b>	0	11	34	4	1
<b>FR2</b>	0	6	39	4	1
<b>FR3</b>	0	1	38	7	4
<b>FR4</b>	0	2	24	15	9

<b>Classificação do CUC (%) ABNT (2016)</b>				
	<b>Muito Boa (≥90)</b>	<b>Boa (≥85)</b>	<b>Regular (≥80)</b>	<b>Ruim (&lt;80)</b>
<b>FR1</b>	0	0	11	39
<b>FR2</b>	0	0	6	44
<b>FR3</b>	0	0	1	49
<b>FR4</b>	0	0	2	48

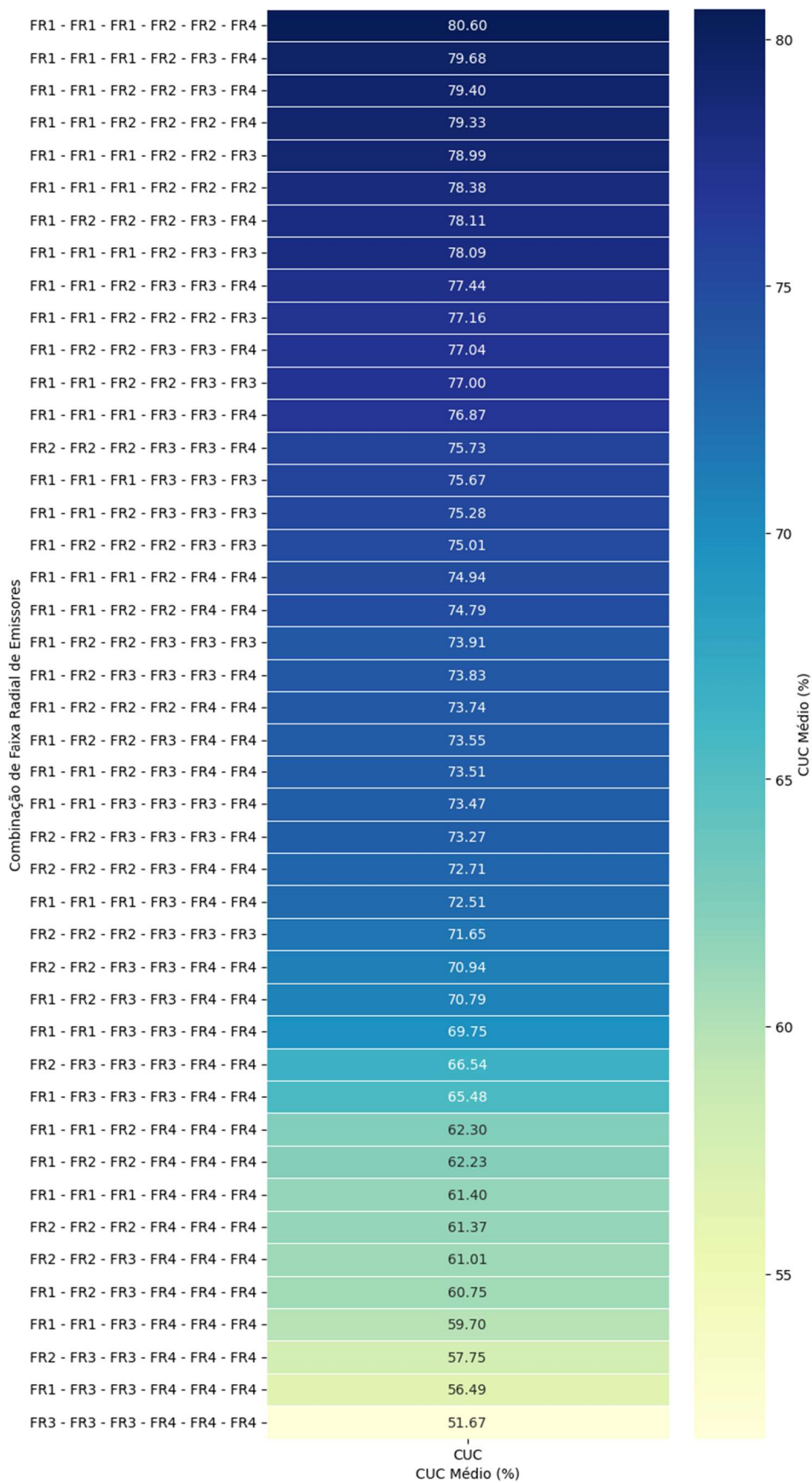
Fonte: Autor

#### 4.7.1.4 Sextetos entupidos

Nos cenários com seis emissores entupidos, a combinação de maior uniformidade reuniu todos os emissores da FR 1, dois da FR 2 e um da FR 4, atingindo CUC médio de 80,60%. Em contrapartida, a menor uniformidade foi observada quando houve entupimento de todos os emissores das FRs 3 e 4, resultando em CUC médio de 51,67%. Esse resultado reforça, de forma consistente com os grupos anteriores, a elevada relevância dos emissores periféricos na degradação do CUC.

Apesar da tendência geral de maior impacto à medida que aumenta a distância radial dos emissores entupidos, observa-se a ocorrência de algumas “distorções” inerentes à combinação espacial dos entupimentos. No cenário de maior uniformidade, por exemplo, houve participação da FR 4, enquanto a combinação formada pelos seis primeiros emissores do pivô (isto é, todos os emissores das FRs 1 e 2) apresentou CUC de 78,38%, o que representa uma diferença de 3,22 pontos percentuais em relação ao melhor cenário. A Figura 23 apresenta a relação completa dos agrupamentos combinatórios em sextetos e seus respectivos valores médios de CUC.

Figura 23 – Relação de agrupamentos combinatórios em sextetos e CUC (%) médio



Fonte: Autor

A Tabela 14 evidencia que, nos sextetos, a distribuição mais espaçada dos entupimentos ao longo do raio tende a manter o CUC na classe “Razoável” segundo Mantovani (2001), embora com menor participação relativa da FR 4 nessa faixa de desempenho. Já nas classes “Ruim” e “Péssimo” (MANTOVANI, 2001), a FR 4 apresenta maior frequência, reforçando sua contribuição para quedas mais severas da uniformidade.

A classe “Bom” (MANTOVANI, 2001) — equivalente a “Regular” na ABNT (2016) — ocorreu apenas no cenário com CUC acima de 80%, que corresponde justamente à maior uniformidade observada entre os sextetos. A ABNT (2016) classifica todas as demais combinações como “Ruim”, indicando maior rigor para as condições de entupimento envolvendo seis emissores. Já Mantovani (2001) ainda enquadra boa parte dessas situações como “Razoável”, mesmo quando o entupimento representa aproximadamente um sexto dos emissores do sistema.

Tabela 14 – Frequência de grupos de emissores por FR, em função das classificações de uniformidade (Mantovani, 2001; ABNT, 2016), para entupimentos em sextetos

	<b>Classificação do CUC (%) Mantovani (2001)</b>				
	<b>Excelente (&gt;=90)</b>	<b>Bom (&gt;=80)</b>	<b>Razoável (&gt;=70)</b>	<b>Ruim (&gt;=60)</b>	<b>Péssimo (&lt;60)</b>
<b>FR1</b>	0	3	50	10	3
<b>FR2</b>	0	2	53	10	1
<b>FR3</b>	0	0	48	10	8
<b>FR4</b>	0	1	29	24	12
	<b>Classificação do CUC (%) ABNT (2016)</b>				
	<b>Muito Boa (&gt;=90)</b>	<b>Boa (&gt;=85)</b>	<b>Regular (&gt;=80)</b>	<b>Ruim (&lt;80)</b>	
<b>FR1</b>	0	0	3	63	
<b>FR2</b>	0	0	2	64	
<b>FR3</b>	0	0	0	66	
<b>FR4</b>	0	0	1	65	

Fonte: Autor

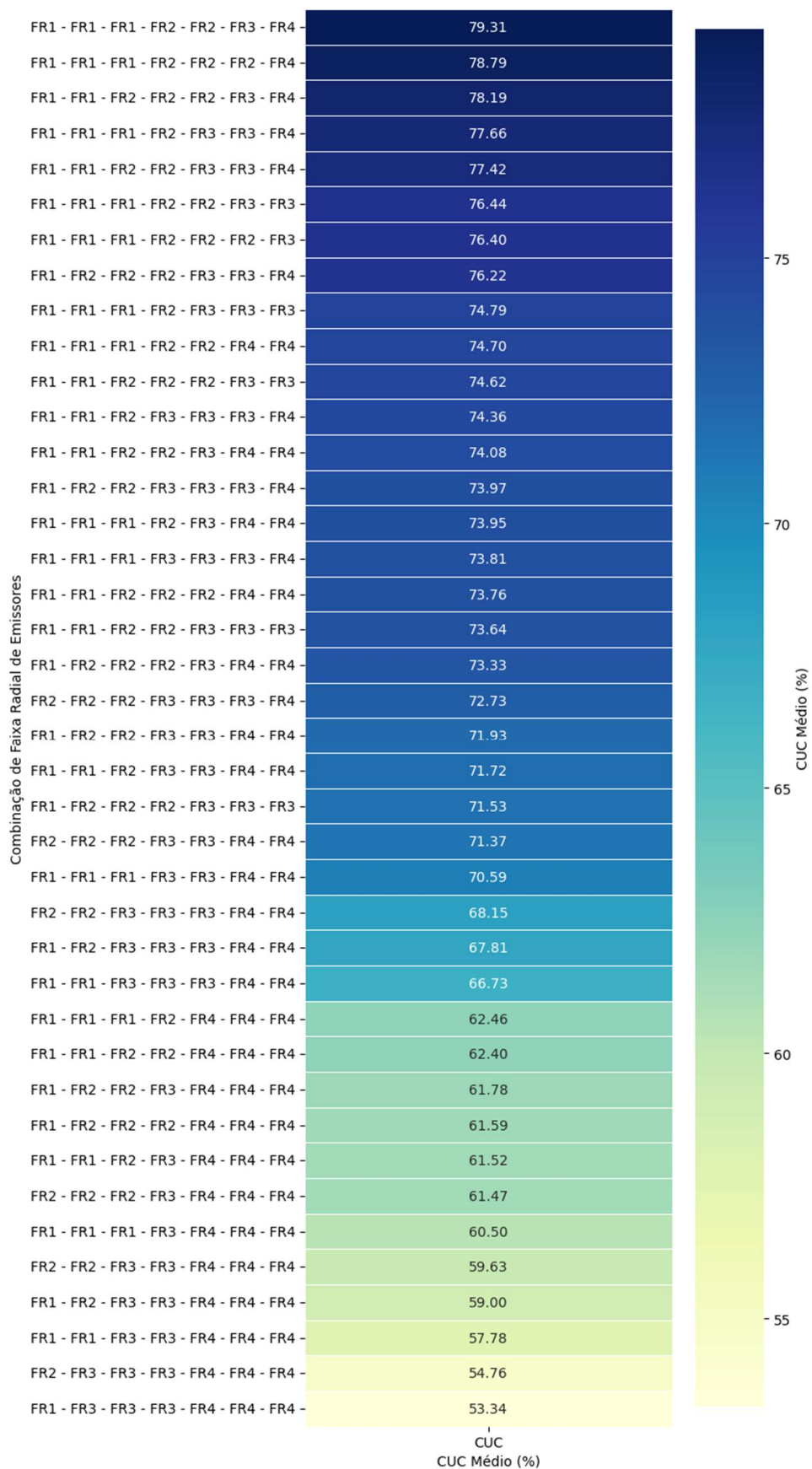
#### 4.7.1.5 Septetos entupidos

Nos cenários com sete emissores entupidos, a maior uniformidade foi observada em combinações com distribuição mais espaçada de entupimentos ao longo do raio. Duas das três combinações com maior CUC incluíram emissores das quatro FRs. A combinação de melhor desempenho (79,31%) reuniu a totalidade da FR 1, dois emissores da FR 2 e um emissor em cada uma das FRs 3 e 4.

De modo geral, os cenários com maiores uniformidades apresentam predominância da FR 1 com participação relevante da FR 2. Em contraste, combinações com predominância das FRs 3 e 4 produziram reduções mais severas, e a presença integral dessas faixas reduziu o CUC a valores inferiores a 60%, reforçando o papel crítico dos emissores periféricos no desempenho do sistema.

A comparação entre a melhor combinação e a décima sexta maior uniformidade também evidencia a relevância da FR 3: ao substituir dois emissores da FR 2 por dois da FR 3, mantendo o mesmo número total de entupimentos, o CUC reduz-se de 79,31% para 73,81%, o que corresponde a uma queda de 5,50 pontos percentuais. A Figura 24 apresenta a relação completa dos agrupamentos combinatórios em septetos e seus valores médios de CUC.

Figura 24 – Relação de agrupamentos combinatórios em septetos e CUC (%) médio



Fonte: Autor

A Tabela 15 resume as frequências por FR e por classe. Todos os septetos são classificados como “Ruim” pela ABNT (2016), pois apresentam CUC inferior a 80%. Pela classificação de Mantovani (2001), entretanto, os septetos ainda se distribuem entre “Razoável”, “Ruim” e “Péssimo”. Observa-se que 25 das 40 combinações apresentaram CUC acima de 70%, sendo classificadas como “Razoável”. Nessa classe, a distribuição de entupimentos é relativamente mais equilibrada: há 51 repetições nas FRs 1 e 2, 45 na FR 3 e 28 na FR 4.

As classes “Ruim” e “Péssimo” concentram entupimentos nas FRs 3 e 4, sendo a concentração mais evidente na classe “Péssimo”: registram-se 8 repetições nas duas primeiras faixas, contra 27 nas duas últimas, o que evidencia o aumento do impacto associado ao deslocamento do entupimento para a periferia do pivô.

Tabela 15 – Frequência de grupos de emissores por FR, em função das classificações de uniformidade (Mantovani, 2001; ABNT, 2016), para entupimentos em septetos

<b>Classificação do CUC (%) Mantovani (2001)</b>					
	<b>Excelente (≥90)</b>	<b>Bom (≥80)</b>	<b>Razoável (≥70)</b>	<b>Ruim (≥60)</b>	<b>Péssimo (&lt;60)</b>
<b>FR1</b>	0	0	51	15	4
<b>FR2</b>	0	0	51	15	4
<b>FR3</b>	0	0	45	13	12
<b>FR4</b>	0	0	28	27	15
<b>Classificação do CUC (%) ABNT (2016)</b>					
	<b>Muito Boa (≥90)</b>	<b>Boa (≥85)</b>	<b>Regular (≥80)</b>	<b>Ruim (&lt;80)</b>	
<b>FR1</b>	0	0	0	70	
<b>FR2</b>	0	0	0	70	
<b>FR3</b>	0	0	0	70	
<b>FR4</b>	0	0	0	70	

Fonte: Autor

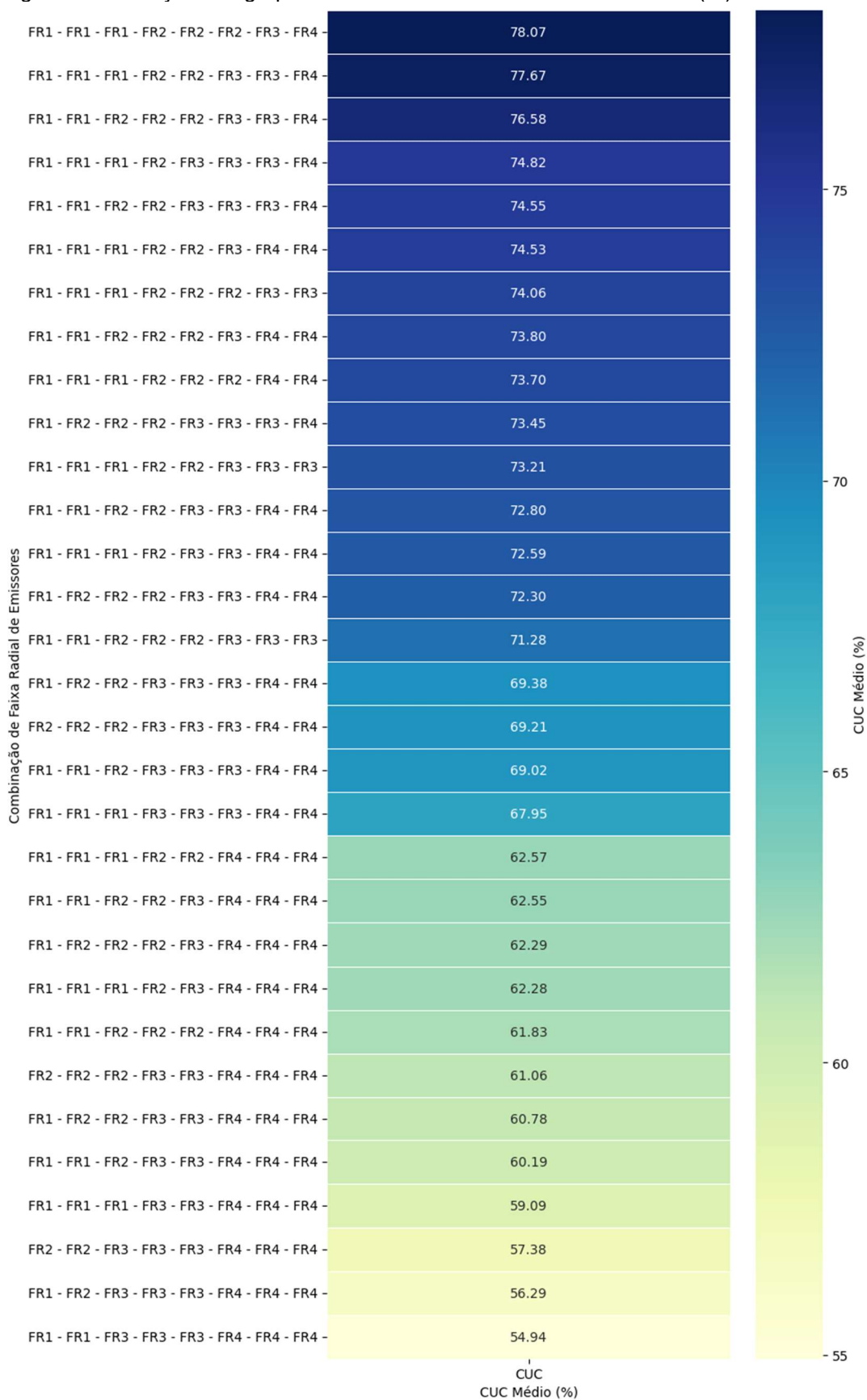
#### 4.7.1.6 Octetos entupidos

Nos cenários com oito emissores entupidos, a maior uniformidade foi de 78,07%, obtida quando houve entupimento integral das FRs 1 e 2, acrescido do entupimento de um emissor em cada uma das FRs 3 e 4. As quatro combinações com maiores valores de CUC apresentaram, no mínimo, a FR 1 ou a FR 2 integralmente, indicando maior tolerância relativa do sistema quando o entupimento permanece concentrado nas regiões mais próximas ao centro. Em contrapartida, a FR 3, quando presente de forma integral, provocou reduções mais expressivas. Isso é evidenciado

ao comparar o terceiro e o quarto melhores cenários: ao substituir um emissor da FR 2 por um da FR 3 (tornando integral a FR 3), a uniformidade decaiu de 76,58% para 74,82%, diferença mais pronunciada do que a observada entre cenários adjacentes no ranking de desempenho.

A presença integral da FR 4 foi ainda mais crítica: em todas as combinações em que essa faixa esteve integralmente entupida, o maior CUC observado foi de 62,57%, reafirmando que a degradação do desempenho é mais severa quando o entupimento se concentra na periferia. A Figura 25 apresenta os valores médios de CUC dos agrupamentos combinatórios em octetos.

Figura 25 – Relação de agrupamentos combinatórios em octetos e CUC (%) médio



Fonte: Autor

A Tabela 16 apresenta as frequências por FR segundo as classificações vigentes. Enquanto a ABNT (2016) enquadra todas as combinações como “Ruim”, Mantovani (2001) classifica 16 das 31 combinações como “Razoável”. Nessa classe, observam-se 102 aparições combinadas das FRs 1, 2 e 3, frente a apenas 18 da FR 4. Para as classes “Ruim” e “Péssimo”, a FR 4 apresenta maior frequência relativa, confirmando sua relevância na redução mais acentuada do CUC.

Na categoria “Ruim” (MANTOVANI, 2001), a primeira metade do pivô totaliza 43 ocorrências (20 na FR1 e 23 na FR2), enquanto a segunda metade totaliza 53 ocorrências (21 na FR3 e 32 na FR4). Na classe “Péssimo”, registram-se 9 ocorrências na primeira metade e 23 na segunda, reforçando que, nas duas piores classes, a frequência de entupimentos concentra-se majoritariamente na porção distal do raio.

Tabela 16 – Frequência de grupos de emissores por FR, em função das classificações de uniformidade (Mantovani, 2001; ABNT, 2016), para entupimentos em octetos

<b>Classificação do CUC (%) Mantovani (2001)</b>					
	<b>Excelente (≥90)</b>	<b>Bom (≥80)</b>	<b>Razoável (≥70)</b>	<b>Ruim (≥60)</b>	<b>Péssimo (&lt;60)</b>
<b>FR1</b>	0	0	36	20	6
<b>FR2</b>	0	0	36	23	3
<b>FR3</b>	0	0	30	21	11
<b>FR4</b>	0	0	18	32	12
<b>Classificação do CUC (%) ABNT (2016)</b>					
	<b>Muito Boa (≥90)</b>	<b>Boa (≥85)</b>	<b>Regular (≥80)</b>	<b>Ruim (&lt;80)</b>	
<b>FR1</b>	0	0	0	62	
<b>FR2</b>	0	0	0	62	
<b>FR3</b>	0	0	0	62	
<b>FR4</b>	0	0	0	62	

Fonte: Autor

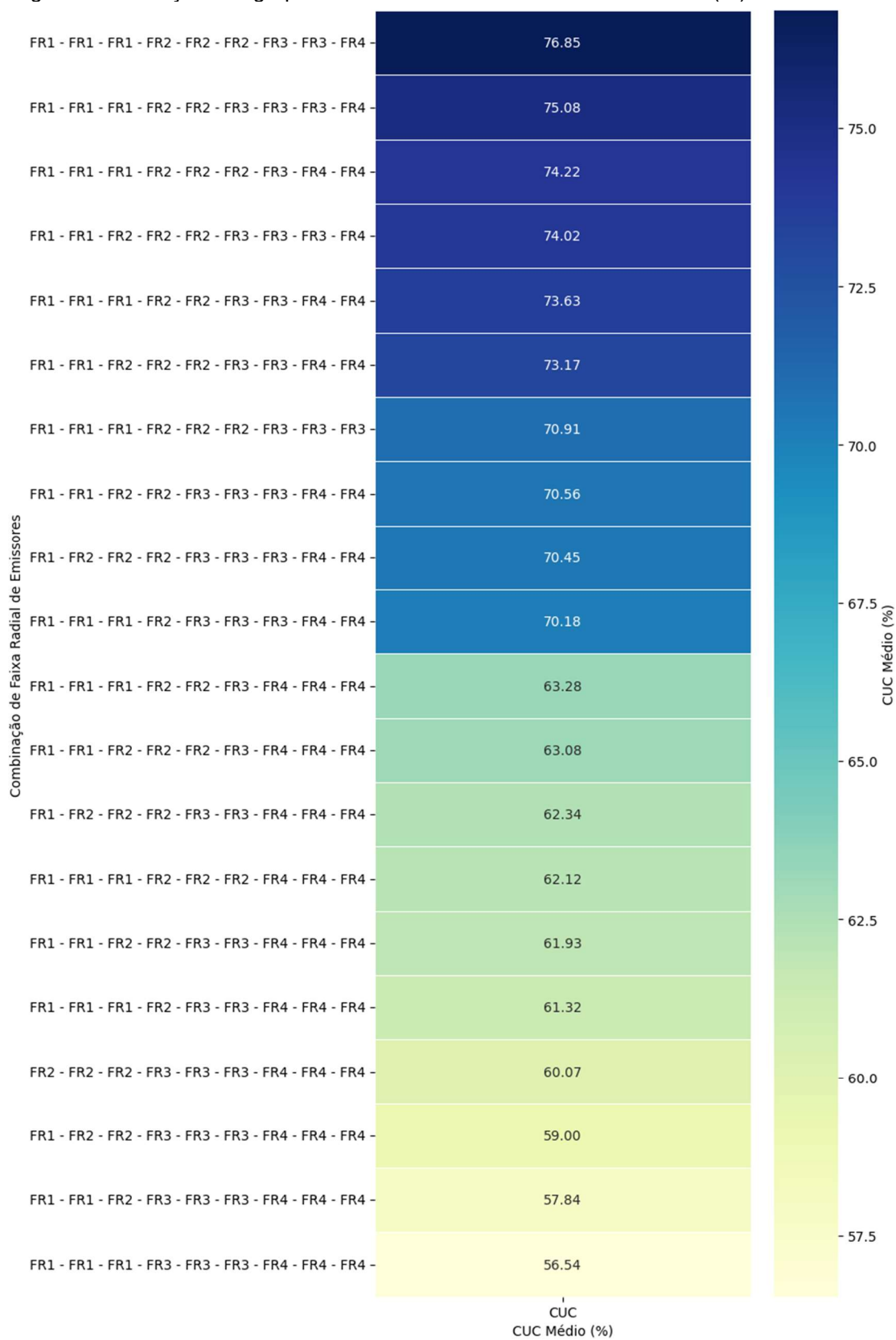
#### 4.7.1.7 Nonetos entupidos

Nos cenários com nove emissores entupidos, a maior uniformidade (76,85%) foi obtida quando houve entupimento integral das FRs 1 e 2, associado ao entupimento de dois emissores da FR 3 e de um emissor da FR 4, conforme ilustrado na Figura 26. A segunda maior uniformidade resultou da troca do entupimento integral da FR 2 pelo entupimento integral da FR 3, reduzindo o CUC para 75,08%, isto é, uma queda de 1,77 ponto percentual.

De modo geral, o entupimento integral das FRs 1 e 2 não provocou reduções tão pronunciadas entre as vinte combinações possíveis. Em contrapartida, a participação integral das FRs 3 e 4 mostrou-se decisiva para a ocorrência de quedas mais severas. Isso fica evidente ao comparar o cenário com entupimento integral das FRs 1, 2 e 3 (70,91%) com o cenário em que o entupimento ocorre nas FRs 1, 2 e 4 (62,12%), diferença de 8,79 pontos percentuais, o que evidencia o efeito crítico da FR 4.

As três combinações com menores valores de CUC apresentaram entupimento integral das FRs 3 e 4. A terceira pior combinação registrou 59,00%, com um emissor da FR 1 e dois emissores da FR 2, além do entupimento integral das FRs 3 e 4. A segunda pior combinação apresentou 57,84%, invertendo a quantidade de emissores das FRs 1 e 2 e mantendo entupimentos integrais nas Faixas 3 e 4. O pior cenário registrou 56,54%, com entupimento integral das FRs 1, 3 e 4.

Figura 26 – Relação de agrupamentos combinatórios em nonetos e CUC (%) médio



Fonte: Autor

Pela ABNT (2016), todas as combinações com nonetos são classificadas como “Ruim”, por apresentarem CUC inferior a 80%. Pela classificação de Mantovani (2001), os resultados distribuem-se em “Razoável”, “Ruim” e “Péssimo”, e a Tabela 17 apresenta as frequências por FR em cada classe. Na classe “Razoável”, há 25 ocorrências em cada uma das FRs 1, 2 e 3, enquanto a FR 4 apresenta 15 ocorrências, o que reforça a menor participação relativa da periferia nos cenários de melhor desempenho.

Na classe “Ruim”, a primeira metade do pivô totaliza 31 ocorrências (14 na FR 1 e 17 na FR 2), enquanto a segunda metade totaliza 32 ocorrências, com destaque para a FR 4 (21 ocorrências). Esse comportamento se intensifica na classe “Péssimo”, na qual a primeira metade do pivô apresenta aproximadamente metade das ocorrências registradas na segunda metade, reforçando o papel da periferia na degradação do CUC.

Tabela 17 – Frequência de grupos de emissores por FR, em função das classificações de uniformidade (Mantovani, 2001; ABNT, 2016), para entupimentos em nonetos

	<b>Classificação do CUC (%) Mantovani (2001)</b>				
	<b>Excelente (≥90)</b>	<b>Bom (≥80)</b>	<b>Razoável (≥70)</b>	<b>Ruim (≥60)</b>	<b>Péssimo (&lt;60)</b>
<b>FR1</b>	0	0	25	14	6
<b>FR2</b>	0	0	25	17	3
<b>FR3</b>	0	0	25	11	9
<b>FR4</b>	0	0	15	21	9

	<b>Classificação do CUC (%) ABNT (2016)</b>			
	<b>Muito Boa (≥90)</b>	<b>Boa (≥85)</b>	<b>Regular (≥80)</b>	<b>Ruim (&lt;80)</b>
<b>FR1</b>	0	0	0	45
<b>FR2</b>	0	0	0	45
<b>FR3</b>	0	0	0	45
<b>FR4</b>	0	0	0	45

Fonte: Autor

#### 4.7.1.8 Decatetos entupidos

As combinações com dez emissores entupidos apresentaram máxima uniformidade de 74,53%, obtida no cenário com entupimento integral das FRs 1, 2 e 3, acrescido de um único emissor entupido na FR 4, conforme ilustrado na Figura 27. Esse resultado reforça que, mesmo em cenários com elevada quantidade de

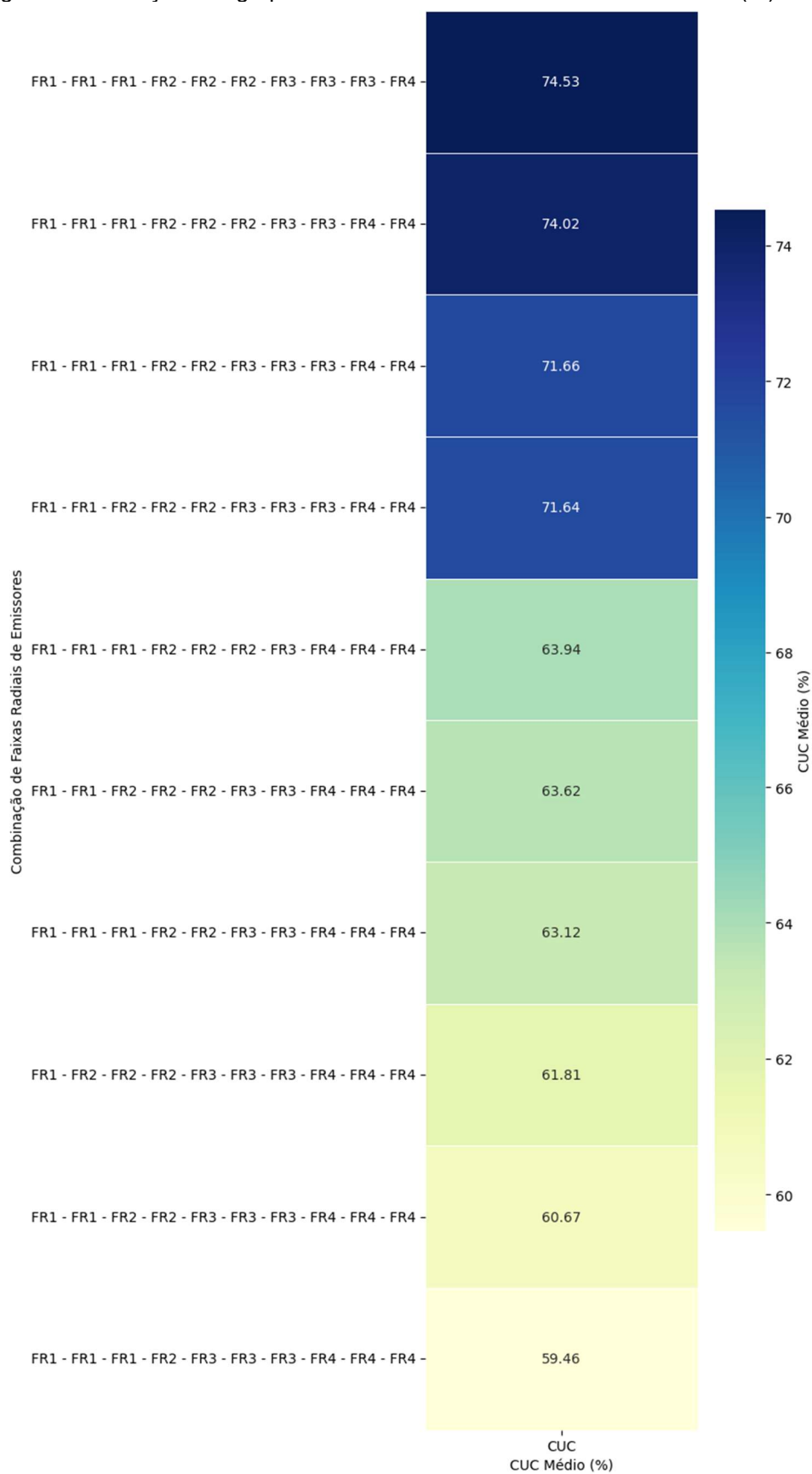
entupimentos, a uniformidade pode permanecer relativamente superior quando a participação da FR 4 é restrita.

Ao analisar especificamente a FR 4, observa-se que a presença de dois emissores entupidos nessa faixa tende a provocar reduções mais expressivas de uniformidade, sobretudo quando, no mesmo cenário, ocorre o entupimento integral da FR 3. Esse comportamento evidencia a relevância combinada das faixas distais do pivô, cujas áreas associadas têm maior peso no cálculo do CUC adaptado.

A combinação de maior uniformidade com entupimento integral da FR 4 apresentou queda de 7,70 pontos percentuais em relação à combinação imediatamente superior, passando de 71,64% para 63,94%. É importante destacar que o cenário com 71,64% inclui o entupimento integral da FR 3, enquanto a combinação imediatamente inferior reúne o entupimento integral das FRs 1, 2 e 4, somado a um único entupimento na FR 3. Em conjunto, esses resultados evidenciam a elevada relevância da FR 4 para o impacto no valor do Coeficiente de Uniformidade de Christiansen: quanto maior a quantidade de emissores entupidos nessa faixa, menor tende a ser a uniformidade do sistema.

As quatro combinações com menores valores de uniformidade apresentaram o entupimento integral das FRs 3 e 4, indicando uma forte concentração do impacto na segunda metade do pivô. A pior combinação registrou um CUC de 59,46%.

Figura 27 – Relação de agrupamentos combinatórios em decatetos e CUC (%) médio



Fonte: Autor

A Tabela 18 apresenta a frequência dos grupos de emissores por FR, em função das classificações dos decatetos. Pelo critério da ABNT (2016), todas as combinações com decatetos são classificadas como “Ruim”, uma vez que os valores de CUC permanecem abaixo de 80%.

Pela classificação de Mantovani (2001), os decatetos distribuem-se entre as classes “Razoável”, “Ruim” e “Péssimo”. Na classe “Razoável”, as FRs 1, 2 e 3 apresentaram frequências iguais (11 repetições cada), enquanto a FR 4 apresentou 7 repetições, sugerindo menor participação relativa da periferia nos cenários de melhor desempenho nesse agrupamento.

Na classe “Ruim”, registraram-se 11 repetições nas FRs 1 e 3 e 13 repetições na FR 2. Essa redução de desempenho é consistente com o aumento da frequência da FR 4, que passou a contabilizar 15 repetições, reforçando seu papel crítico na degradação do CUC.

A classe “Péssimo” foi atribuída apenas ao pior cenário, caracterizado pelo entupimento integral das FRs 1, 3 e 4, além de um entupimento único na FR 2.

Tabela 18 – Frequência dos grupos de emissores por FR, em função das classificações de uniformidade (Mantovani, 2001; ABNT, 2016), nos entupimentos em decatetos

	<b>Classificação do CUC (%) Mantovani (2001)</b>				
	<b>Excelente (&gt;=90)</b>	<b>Bom (&gt;=80)</b>	<b>Razoável (&gt;=70)</b>	<b>Ruim (&gt;=60)</b>	<b>Péssimo (&lt;60)</b>
<b>FR1</b>	0	0	11	11	3
<b>FR2</b>	0	0	11	13	1
<b>FR3</b>	0	0	11	11	3
<b>FR4</b>	0	0	7	15	3
	<b>Classificação do CUC (%) ABNT (2016)</b>				
	<b>Muito Boa (&gt;=90)</b>	<b>Boa (&gt;=85)</b>	<b>Regular (&gt;=80)</b>	<b>Ruim (&lt;80)</b>	
<b>FR1</b>	0	0	0	25	
<b>FR2</b>	0	0	0	25	
<b>FR3</b>	0	0	0	25	
<b>FR4</b>	0	0	0	25	

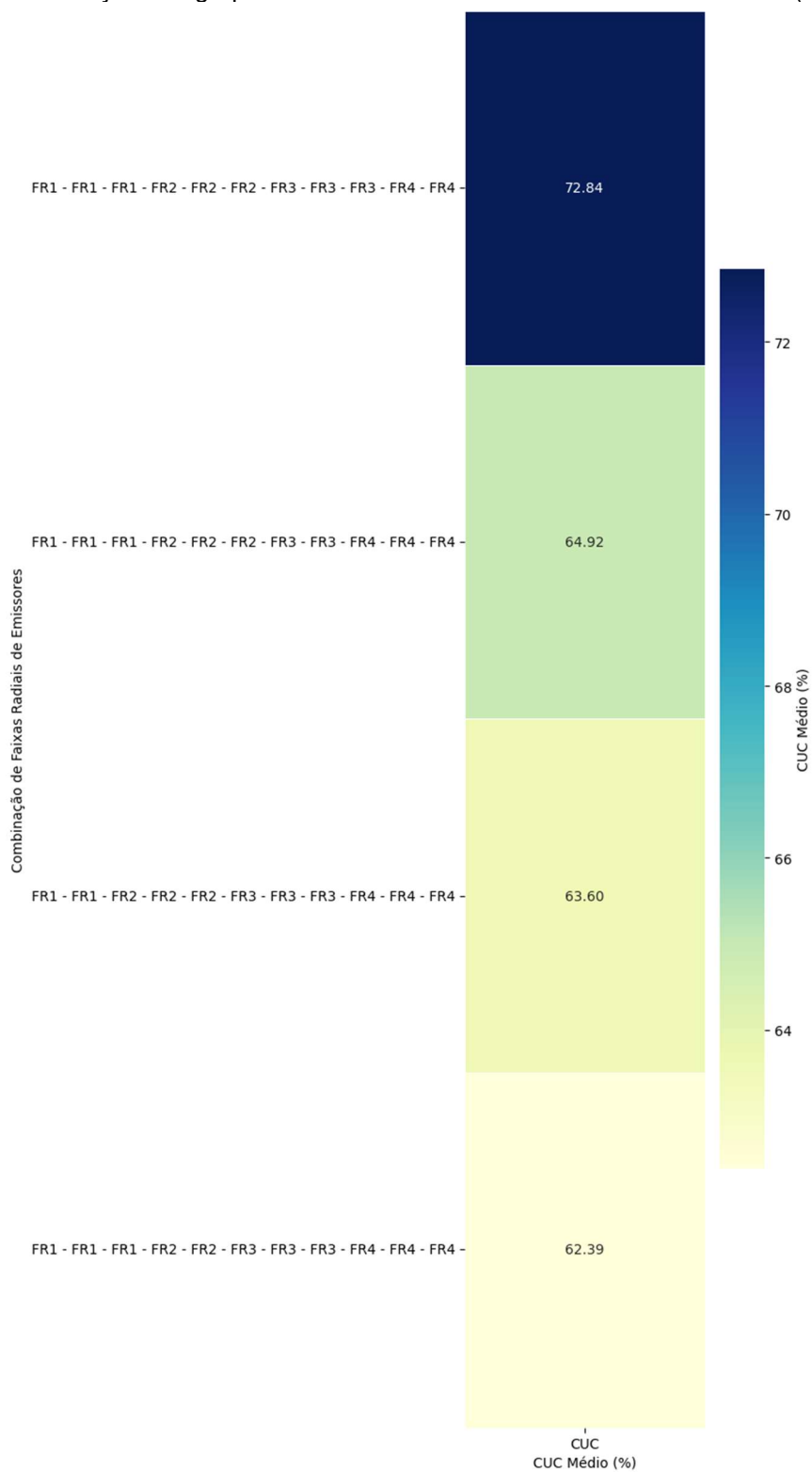
Fonte: Autor

#### **4.7.1.9 Hendecatetos entupidos**

Para a configuração experimental adotada, foram identificados apenas quatro cenários possíveis de combinação com 11 emissores entupidos. Em todas as combinações, ocorre necessariamente o entupimento integral de três FRs, associado ao duplo entupimento na FR restante, conforme apresentado na Figura 28.

A combinação com ausência de entupimento integral na FR 4 apresentou a maior uniformidade, com CUC de 72,84%. Em seguida, o cenário sem entupimento integral na FR 3 registrou 64,92%. A segunda pior combinação ocorreu quando a ausência de entupimento integral foi na FR 1, com 63,60%, enquanto o pior cenário correspondeu à ausência de entupimento integral na FR 2, com uniformidade de 62,39%.

Figura 28 – Relação de agrupamentos combinatórios em hendecatetos e CUC (%) médio



Fonte: Autor

A Tabela 19 apresenta as frequências por FR em função das classificações. A ABNT (2016) classifica todos os hendecatetos como “Ruim”, uma vez que as uniformidades permanecem abaixo de 80%.

Pela classificação de Mantovani (2001), a melhor combinação é classificada como “Razoável”, enquanto as demais são enquadradas como “Ruim”. Não foram observados cenários classificados como “Péssimo” (CUC < 60%) entre os hendecatetos. Esse resultado sugere que, em condições de alta saturação de entupimentos distribuídos, o impacto no CUC não se intensifica com a mesma severidade observada em cenários com menor número de entupimentos, porém concentrados na segunda metade do pivô, especialmente nas faixas mais distais.

Tabela 19 – Frequência dos grupos de emissores por FR, em função das classificações de uniformidade (Mantovani, 2001; ABNT, 2016), nos entupimentos em hendecatetos

	<b>Classificação do CUC (%) Mantovani (2001)</b>				
	<b>Excelente (≥90)</b>	<b>Bom (≥80)</b>	<b>Razoável (≥70)</b>	<b>Ruim (≥60)</b>	<b>Péssimo (&lt;60)</b>
<b>FR1</b>	0	0	3	8	0
<b>FR2</b>	0	0	3	8	0
<b>FR3</b>	0	0	3	8	0
<b>FR4</b>	0	0	2	9	0

	<b>Classificação do CUC (%) ABNT (2016)</b>			
	<b>Muito Boa (≥90)</b>	<b>Boa (≥85)</b>	<b>Regular (≥80)</b>	<b>Ruim (&lt;80)</b>
<b>FR1</b>	0	0	0	11
<b>FR2</b>	0	0	0	11
<b>FR3</b>	0	0	0	11
<b>FR4</b>	0	0	0	11

Fonte: Autor

#### 4.7.1.10 Cenário único com dodecateto entupido

No único cenário com 12 emissores entupidos, caracterizado pelo entupimento integral das quatro FRs, o Coeficiente de Uniformidade de Christiansen foi de 65,36%. Esse valor é superior ao observado em alguns cenários com menor número de emissores entupidos, porém com forte concentração dos entupimentos nas FRs 3 e 4, que têm maior relevância ponderada no cálculo do CUC.

Como exemplo, a pior combinação observada nos sextetos apresentou uniformidade de 51,35%, associada ao entupimento integral das FRs 3 e 4. Assim, a comparação entre o cenário de 12 entupimentos distribuídos e o cenário de 6 entupimentos concentrados nas faixas distais indica uma diferença de 13,42 pontos percentuais no CUC, evidenciando que a disposição espacial dos entupimentos pode ser mais determinante do que a quantidade absoluta de emissores entupidos.

#### 4.7.2 Combinações com equivalências no CUC

Para avaliar o impacto conjunto da quantidade e da disposição dos emissores entupidos (por FRs) no CUC, foram selecionadas combinações cujos valores de uniformidade estavam próximos dos limites das categorias propostas por duas referências: a ABNT (2016) e Mantovani (2001). Essa estratégia permitiu comparar cenários com números crescentes de emissores entupidos, mantendo a uniformidade em patamares semelhantes.

Os pontos de corte definidos para análise foram 60%, 70% e 80% de CUC. Para cada quantidade fixa de emissores entupidos, selecionaram-se as combinações cujo CUC estivesse imediatamente acima de cada limite, permitindo uma comparação direta do efeito da disposição espacial dos entupimentos nas faixas críticas de desempenho. Ressalta-se que apenas um cenário apresentou uniformidade acima de 85% e, conseqüentemente, não foram observados, a partir dos trios, cenários com uniformidade superior a 90%, o que impede a cobertura completa de todas as categorias propostas pelas normas.

##### 4.7.2.1 Combinações de FRs imediatamente acima de 60% no CUC

A Tabela 20 apresenta as combinações de FRs e seus respectivos valores de CUC. Para o ponto de corte de 60%, foram identificadas combinações entre três e doze emissores entupidos, evidenciando que a quantidade de emissores entupidos, isoladamente, não determina diretamente a redução do CUC. De fato, a uniformidade observada em um cenário com três entupimentos foi inferior à observada em um cenário com doze entupimentos.

Tabela 20 – Combinações de FRs imediatamente acima de 60% no CUC

<b>Nº emissores entupidos</b>	<b>Combinação das FRs no entupimento</b>	<b>CUC (%)</b>
3	FR4-FR4-FR4	61,10
4	FR1-FR4-FR4-FR4	61,21
5	FR1-FR1-FR4-FR4-FR4	61,31
6	FR1-FR2-FR3-FR4-FR4-FR4	60,75
7	FR1-FR1-FR1-FR3-FR4-FR4-FR4	60,50

8	FR1-FR1-FR2-FR3-FR3-FR4-FR4-FR4	60,19
9	FR2-FR2-FR2-FR3-FR3-FR3-FR4-FR4-FR4	60,07
10	FR1-FR1-FR2-FR2-FR3-FR3-FR3-FR4-FR4-FR4	60,67
11	FR1-FR1-FR1-FR2-FR2-FR3-FR3-FR3-FR4-FR4-FR4	62,39
12	FR1-FR1-FR1-FR2-FR2-FR2-FR3-FR3-FR3-FR4-FR4-FR4	65,35

Fonte: Autor

A Tabela 21 quantifica os emissores entupidos por FR nas combinações imediatamente acima de 60%. Observa-se grande destaque para a FR 4, com 30 aparições. Todas as combinações consideradas nessa etapa apresentaram entupimento integral da FR 4, e as uniformidades desse intervalo são classificadas como “Ruim” tanto pela ABNT (2016) quanto por Mantovani (2001).

Esse predomínio da FR 4 nas combinações imediatamente acima de 60% reforça o fato de que a disposição radial dos entupimentos, especialmente a concentração na porção distal do pivô, tende a ser mais relevante para a degradação do CUC do que a quantidade total de emissores entupidos.

Tabela 21 – Quantificação dos emissores por FR em combinações acima de 60%

Nº emissores entupidos	FR1	FR2	FR3	FR4	CUC (%)
3	0	0	0	3	61,10
4	1	0	0	3	61,21
5	2	0	0	3	61,31
6	1	1	1	3	60,75
7	3	0	1	3	60,50
8	2	1	2	3	60,19
9	0	3	3	3	60,07
10	2	2	3	3	60,67
11	3	2	3	3	62,39
12	3	3	3	3	65,36
<b>Total</b>	<b>17</b>	<b>12</b>	<b>16</b>	<b>30</b>	

Fonte: Autor

#### 4.7.2.2 Combinações de FRs imediatamente acima de 70% no CUC

A Tabela 22 apresenta as combinações de FRs e os valores de CUC para o ponto de corte de 70%, em cenários com três a onze emissores entupidos. Esse resultado é coerente com o observado para o ponto de corte de 60%, indicando, novamente, que a quantidade de emissores entupidos não é, por si só, um fator

preponderante para a redução do CUC. Os valores de uniformidade oscilam à medida que aumenta o número de entupimentos, evidenciando a influência do arranjo espacial.

Tabela 22 – Combinações de FRs imediatamente acima de 70% no CUC.

<b>Nº emissores entupidos</b>	<b>Combinação das FRs no entupimento</b>	<b>CUC (%)</b>
3	FR3-FR4-FR4	71,27
4	FR1-FR3-FR4-FR4	71,80
5	FR1-FR1-FR3-FR4-FR4	72,19
6	FR1-FR2-FR3-FR3-FR4-FR4	70,79
7	FR1-FR1-FR1-FR3-FR3-FR4-FR4	70,59
8	FR1-FR1-FR2-FR2-FR2-FR3-FR3-FR3	71,28
9	FR1-FR1-FR1-FR2-FR3-FR3-FR3-FR4-FR4	70,18
10	FR1-FR1-FR1-FR2-FR2-FR3-FR3-FR3-FR4-FR4	71,64
11	FR1-FR1-FR1-FR2-FR2-FR2-FR3-FR3-FR3-FR4-FR4	72,84

Fonte: Autor

A Tabela 23 quantifica os emissores por FR nas combinações com uniformidade imediatamente acima de 70% entre trios e hendecatetos, tendo em vista que o cenário com doze emissores entupidos apresentou uniformidade abaixo do ponto de corte. As FRs 1, 3 e 4 foram as mais frequentes no conjunto analisado. A FR 3 apresentou o maior número de ocorrências de entupimento integral (quatro combinações), enquanto a FR 1 apresentou três. Para a FR 4, registraram-se entupimentos duplos em 8 das 9 combinações analisadas

Somando-se as ocorrências, as FRs 3 e 4 (segunda metade do pivô) totalizaram 35 entupimentos nas combinações analisadas, frente a 28 na primeira metade. Esse comportamento é consistente com os resultados do ponto de corte de 60% e reforça que a disposição dos entupimentos, especialmente na porção distal, tende a dominar o efeito sobre a uniformidade.

Tabela 23 – Quantificação dos emissores por FR em combinações acima de 70%

<b>Nº emissores entupidos</b>	<b>FR1</b>	<b>FR2</b>	<b>FR3</b>	<b>FR4</b>	<b>CUC (%)</b>
3	0	0	1	2	71,27
4	1	0	1	2	71,80
5	2	0	1	2	72,19

6	1	1	2	2	70,79
7	3	0	2	2	70,59
8	2	3	3	0	71,28
9	3	1	3	2	70,18
10	3	2	3	2	71,64
11	3	3	3	2	72,84
<b>Total</b>	<b>18</b>	<b>10</b>	<b>19</b>	<b>16</b>	

Fonte: Autor

#### 4.7.2.3 Combinações de FRs imediatamente acima de 80% no CUC

A Tabela 24 apresenta as combinações para o ponto de corte de 80%, no qual apenas os cenários com três a seis emissores entupidos permaneceram acima desse limite. Ainda assim, o CUC das combinações analisadas apresentou baixo desvio padrão, apesar de o número de entupimentos dobrar entre a primeira e a última combinação, o que reforça que a quantidade de emissores entupidos não é, isoladamente, o principal catalisador da redução do CUC.

Tabela 24 – Combinações de FRs imediatamente acima de 80% no CUC

<b>Nº emissores entupidos</b>	<b>Combinação das FRs no entupimento</b>	<b>CUC (%)</b>
3	FR1 - FR3 - FR3	80,91
4	FR1 - FR1 - FR3 - FR3	80,16
5	FR1 - FR1 - FR2 - FR2 - FR4	80,99
6	FR1 - FR1 - FR1 - FR2 - FR2 - FR4	80,60

Fonte: Autor

A Tabela 25 quantifica os entupimentos por FR nas combinações com CUC acima de 80%. A FR 1 concentrou a maior quantidade de entupimentos (8 ocorrências), seguida pelas Faixas 2 e 3, com 4 ocorrências cada, enquanto a FR 4 apresentou apenas 2 ocorrências. Pela ABNT (2016), essas combinações são classificadas como “Regular”, e por Mantovani (2001) como “Boa”. A predominância de entupimentos na primeira metade do pivô, associada a níveis de uniformidade ainda aceitáveis, reforça a interpretação de que o critério radial (distância ao centro e ponderação de área) é mais relevante do que o número absoluto de emissores entupidos.

Tabela 25 – Quantificação dos emissores por FR em combinações acima de 80%

<b>Nº emissores entupidos</b>	<b>FR1</b>	<b>FR2</b>	<b>FR3</b>	<b>FR4</b>	<b>CUC (%)</b>
3	1	0	2	0	80,91
4	2	0	2	0	80,16
5	2	2	0	1	80,99
6	3	2	0	1	80,60
<b>Total</b>	<b>8</b>	<b>4</b>	<b>4</b>	<b>2</b>	

Fonte: Autor

#### 4.7.3 Efeito do CUC em função da quantidade de emissores entupidos

O entupimento combinatório dos 12 emissores experimentais resultou em 4.095 cenários, construídos por meio do encadeamento dos volumes coletados em campo. Esses cenários foram divididos em subgrupos conforme o número de emissores entupidos, e calculou-se o CUC médio para cada subgrupo. Foram considerados tanto os dados volumétricos primários quanto os ajustados por evaporação, com reposição volumétrica, conforme a ABNT NBR ISO 11545:2016. A Tabela 26 apresenta as médias de uniformidade por subgrupo sem reposição volumétrica.

Tabela 26 – Relação entre os subgrupos pela quantidade de emissores entupidos e as médias de uniformidade sem consideração da evaporação

<b>Quantidade de Emissores Entupidos</b>	<b>CUC Médio (%)</b>
0	91,10
1	87,12
2	83,10
3	80,19
4	77,79
5	75,67
6	73,71
7	71,87
8	70,12
9	68,45
10	67,00
11	65,94
12	65,36

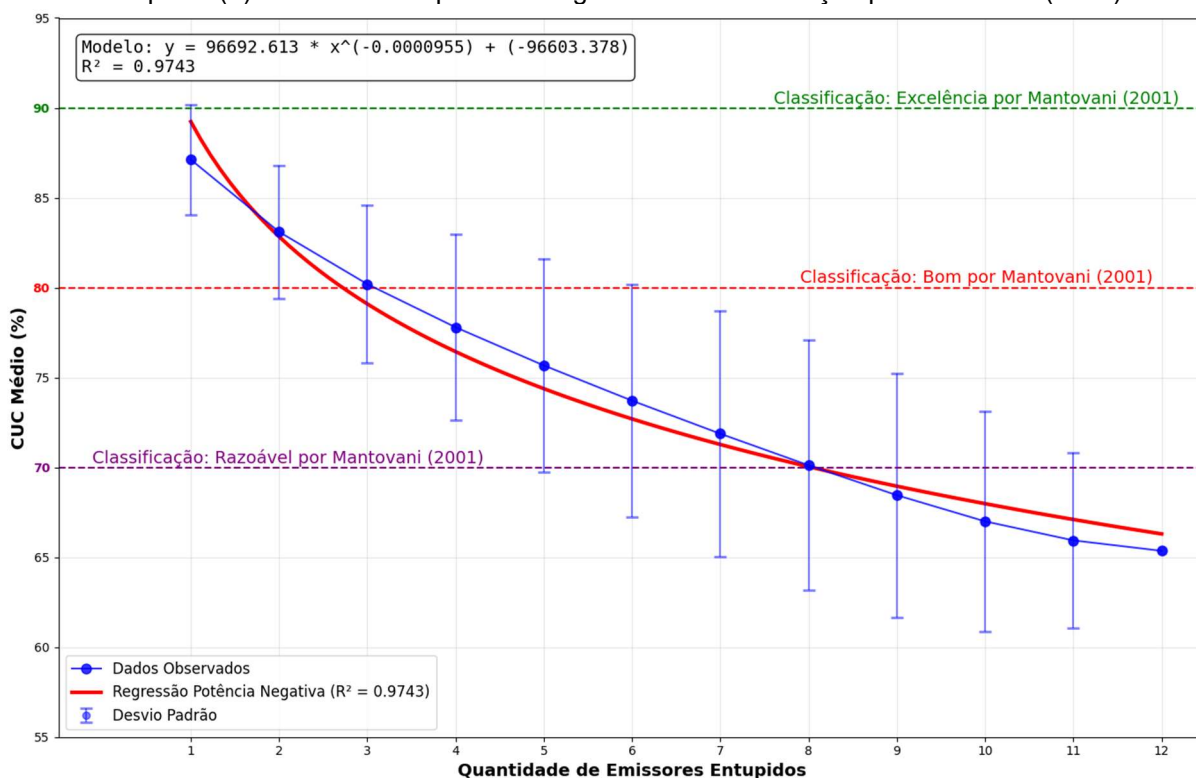
Fonte: Autor

A Figura 29 apresenta a variação do CUC médio em função do número de emissores entupidos (sem reposição volumétrica), associando os resultados às classes de Mantovani (2001).

#### 4.7.4 Avaliação do modelo sem reposição volumétrica para a classificação de Mantovani (2001)

A Figura 29 apresenta a variação da uniformidade em função da quantidade de emissores entupidos para os dados sem reposição volumétrica, correlacionando com a classificação proposta por Mantovani (2001).

Figura 29 – Variação do CUC Médio (sem reposição volumétrica) com a quantidade de emissores entupidos ( $x$ ) em modelo de potência negativa com classificação por Mantovani (2001)



Fonte: Autor

O modelo de potência negativa ajustado, apresentado na Equação 15, obteve  $R^2 = 0,97$ .

$$\hat{Y} = 96.692,613 X^{-0,0000955} - 96.603,378 \quad (15)$$

$$R^2 = 0,97$$

Em que:

$\hat{Y}$  = Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (%)

$X$  = Quantidade de emissores entupidos.

A classificação de Mantovani (2001) enquadrou como “Bom” grande parte dos cenários com até dois emissores entupidos e posicionou o subgrupo de três

entupimentos (média de 80,19%) próximo ao limite inferior da categoria (80%). Assim, parte das combinações abaixo da média passa a ser classificada como “Razoável”. De forma análoga, o subgrupo com oito emissores entupidos apresentou média de 70,12%, próxima ao limite entre “Razoável” e “Ruim”.

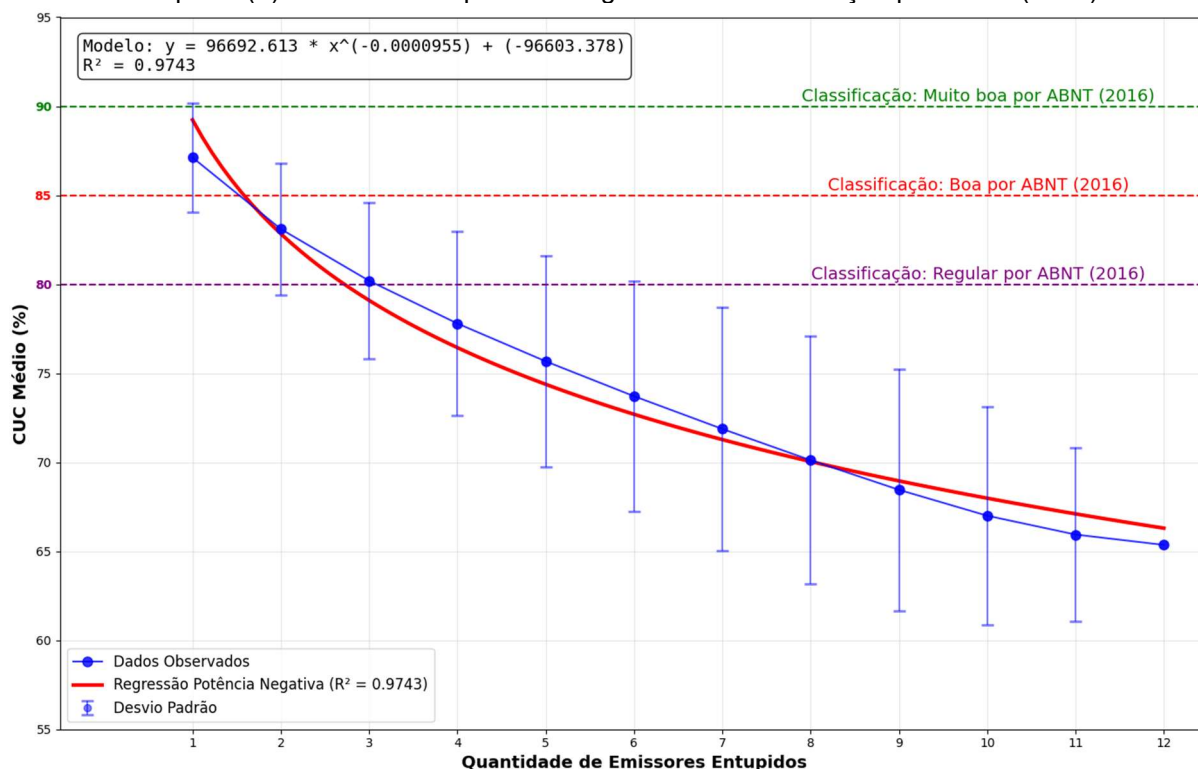
A análise conjunta das médias e dos desvios padrão evidencia que diferentes combinações podem resultar em percentuais semelhantes de uniformidade, mesmo com quantidades distintas de emissores entupidos. Por exemplo, para a classe “Bom” podem existir cenários de dois a seis emissores entupidos, o que reforça a relevância da disposição dos entupimentos, mostrando que a quantidade de emissores entupidos não é o parâmetro mais relevante para impactar a uniformidade de aplicação de água em pivô central.

Por fim, ao considerar apenas as médias, a classificação de Mantovani (2001) mostra baixa sensibilidade às condições críticas para o pivô estudado, chegando a classificar como “Razoável” cenários com até 11 emissores entupidos e como “Bom” cenários com até 5 entupimentos, onde 13,88% dos emissores do sistema estão entupidos.

#### **4.7.5 Avaliação do modelo sem reposição volumétrica para a classificação ABNT (2016)**

A Figura 30 apresenta o mesmo modelo, agora relacionado às classes da ABNT (2016).

Figura 30 – Variação do CUC Médio (sem reposição volumétrica) com a quantidade de emissores entupidos ( $x$ ) em modelo de potência negativa com classificação por ABNT (2016)



Fonte: Autor

Considerando a dispersão dos dados, apenas os cenários com um e, em poucos casos, com dois entupimentos puderam ser classificados como “Boa”, enquanto a maior parte dos cenários com dois entupimentos foi classificada como “Regular”. Essa categoria também contemplou cenários que vão de entupimentos únicos a quintetos. A partir de seis entupimentos, a ABNT (2016) classificou os cenários como “Ruim”. Quando se observam apenas as médias, “Boa” ficou restrita ao entupimento único, “Regular” abrangeu duplas e trios e, a partir de quartetos, as médias passaram a ser enquadradas como “Ruim”.

Assim, embora a análise combinatória indique que a quantidade de emissores entupidos não seja o único fator determinante da uniformidade, a ABNT (2016) mostrou maior sensibilidade à quantidade, classificando como “Ruim” os cenários a partir dos quartetos e aceitando como “Boa” apenas condições com, no máximo, dois emissores entupidos.

#### 4.7.6 Modelagem dos dados com reposição da evaporação

O encadeamento também foi realizado utilizando os dados volumétricos corrigidos com reposição da evaporação, conforme a ABNT NBR ISO 11545:2016. As combinações foram novamente agrupadas por número de emissores entupidos, e a Tabela 27 apresenta as médias de uniformidade por subgrupo.

Tabela 27 – Relação entre os subgrupos pela quantidade de emissores entupidos e as médias de uniformidade considerando a evaporação pela ABNT NBR ISO 11545:2016

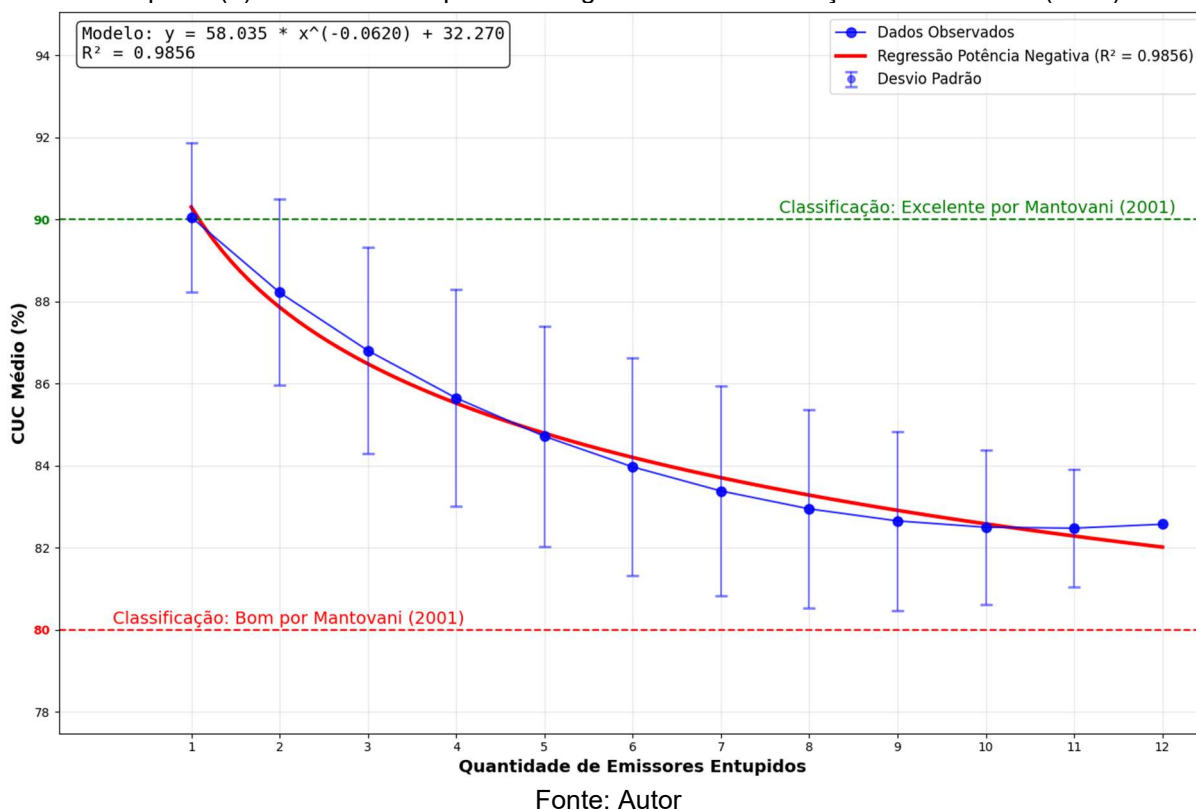
<b>Quantidade de Emissores Entupidos</b>	<b>CUC Médio (%)</b>
0	91,82
1	89,91
2	88,22
3	86,81
4	85,65
5	84,72
6	83,97
7	83,38
8	82,95
9	82,65
10	82,50
11	82,48
12	82,57

Fonte: Autor

Conforme a Figura 31, a relação entre a quantidade de entupimentos e o CUC médio apresenta tendência decrescente, com redução progressiva das diferenças entre as médias. Observa-se, contudo, um comportamento de “vale”, pois a média dos cenários com onze entupimentos foi levemente inferior à dos cenários com doze entupimentos, refletindo particularidades do processo de correção volumétrica e da distribuição dos entupimentos.

#### 4.7.7 Avaliação do modelo com reposição volumétrica para a classificação de Mantovani (2001)

Figura 31 – Variação do CUC Médio (com reposição volumétrica) e a quantidade de emissores entupidos (x) em modelo de potência negativa com classificação de Mantovani (2001)



Mesmo com o comportamento de vale, o ajuste por potência negativa manteve-se, com  $R^2 = 0,98$ , conforme a Equação 16.

$$\hat{Y} = 58,035 X^{-0,0620} + 32,270 \quad (16)$$

$$R^2 = 0,98$$

Em que:

$\hat{Y}$  = Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (%)

$X$  = Quantidade de emissores entupidos

A reposição volumétrica tende a elevar o CUC, uma vez que corrige os volumes ao longo do tempo de exposição até a leitura, resultando em valores de uniformidade superiores aos observados sem reposição.

Nessas condições, todos os subgrupos quantitativos apresentaram uniformidades classificadas como “Excelente” ou “Bom” por Mantovani (2001). O subgrupo com entupimento único, por exemplo, apresentou média acima de 90%, e parte das combinações desse subgrupo foi classificada como “Excelente”; comportamento semelhante ocorreu em algumas combinações do subgrupo de duplas. Os demais subgrupos, de trios a doze entupimentos, permaneceram integralmente classificados como “Bom”, inclusive considerando os desvios.

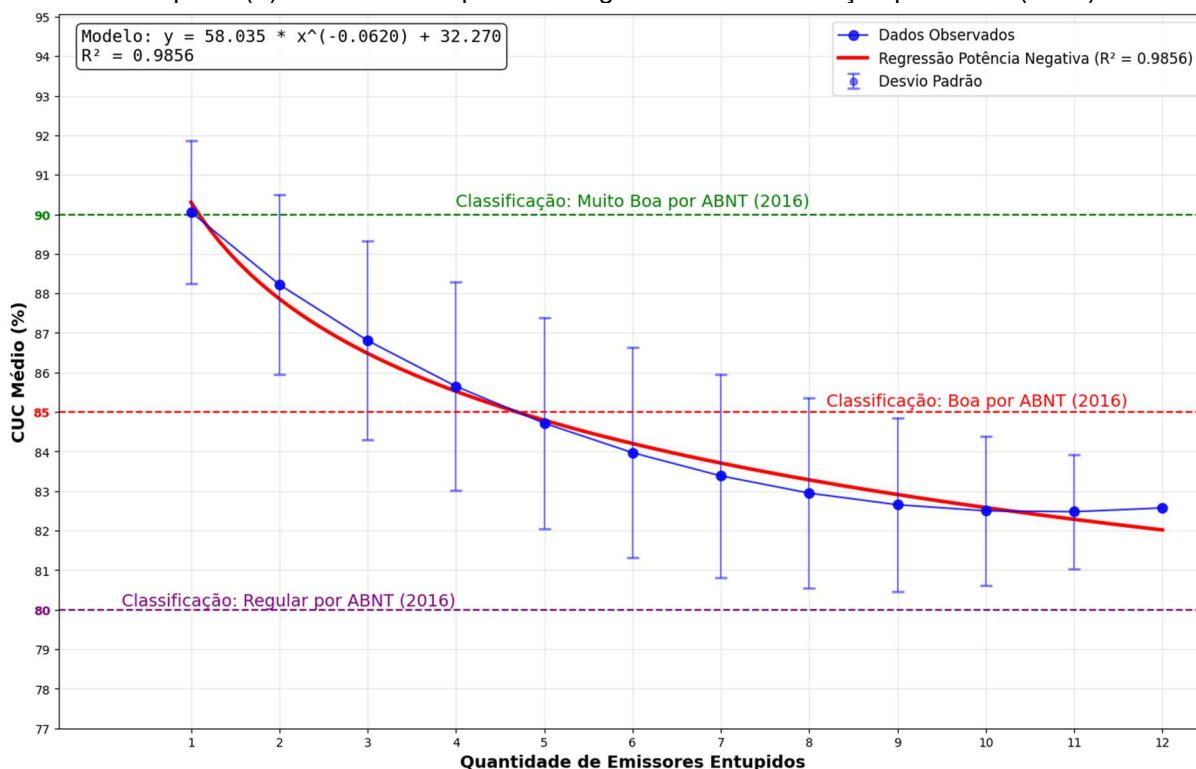
A apresentação de uniformidades bem classificadas, ainda condicionadas aos cenários de múltiplos entupimentos, indica que o emprego metodológico da reposição volumétrica, conforme a normativa ABNT NBR ISO 11545:2016, em conjunto com a classificação proposta por Mantovani (2001), apresenta insensibilidade aos entupimentos, indicando baixa precisão avaliativa e, por consequência, ocultando condições operacionais críticas de entupimento. Isso indica que, para o pivô experimental nesta classificação, embora ocorra entupimento em 33,3% dos emissores, ainda não é suficiente para classificá-lo de forma mais crítica, sendo atribuída a classificação “Boa” para a uniformidade do sistema.

Vale ressaltar que, da mesma forma como analisado no modelo sem reposição volumétrica, existirão combinações com a mesma uniformidade, ainda que apresentem diferentes quantidades de emissores entupidos, o que indica que a disposição dos entupimentos é um parâmetro mais relevante do que a quantidade de entupimentos.

#### **4.7.8 Avaliação do modelo com reposição volumétrica para a classificação da ABNT (2016)**

A Figura 32 apresenta a relação entre a quantidade de emissores entupidos e o CUC médio com reposição volumétrica, conforme a classificação da ABNT (2016).

Figura 32 – Variação do CUC Médio (com reposição volumétrica) e a quantidade de emissores entupidos ( $x$ ) em modelo de potência negativa com classificação por ABNT (2016)



Considerando que a categoria “Muito Boa” é equivalente à “Excelente” em Mantovani (2001), os subgrupos com um e dois entupimentos apresentaram comportamento semelhante nas classes superiores. No subgrupo com três entupimentos, já ocorreram combinações enquadradas como “Regular”.

O subgrupo de quintetos apresentou média próxima ao limite inferior da categoria “Boa”, de modo que apenas uma parcela das combinações foi classificada como “Regular”. Dos sextetos aos octetos, a queda gradativa das médias ampliou a presença de combinações na categoria “Regular”; e, a partir dos nonetos, os subgrupos foram integralmente classificados como “Regular”.

Em síntese, a ABNT (2016) fornece condicionantes mais sensíveis para categorizar a uniformidade em cenários de entupimento, preservando maior rigor mesmo quando aplicada em conjunto com a reposição volumétrica prevista na ABNT NBR ISO 11545:2016.

## **4.8. Análise estatística comparativa entre os dados coletados em campo e as simulações**

### **4.8.1 Comparação entre os dados de uniformidade sem reposição volumétrica**

A análise estatística indicou que não houve diferença significativa entre os valores de CUC simulados e os observados em campo para cenários de entupimento individual ( $p = 0,720$ ), reforçando a consistência do modelo de simulação desenvolvido. Os testes de normalidade de *Shapiro–Wilk* evidenciaram que ambas as amostras (simulação e campo) seguem distribuição normal ( $p = 0,745$  e  $p = 0,200$ , respectivamente), justificando a aplicação do teste  $t$  pareado para comparação direta entre os métodos. O teste  $t$  resultou em  $p = 0,720$ , valor superior ao nível de significância de 5%; portanto, não se rejeita a hipótese nula, concluindo-se que não há diferença estatisticamente significativa entre os valores simulados e observados, o que confirma a adequação do modelo proposto.

### **4.8.2 Comparação entre os dados de uniformidade com reposição volumétrica**

De forma análoga, a análise concluiu pela inexistência de diferença significativa entre os valores de CUC simulados e os observados em campo para cenários de entupimento individual ( $p = 0,081$ ), corroborando a precisão do modelo sob a condição de reposição volumétrica. Os testes de normalidade de *Shapiro–Wilk* indicaram distribuição normal para ambas as amostras ( $p = 0,165$  para as simulações e  $p = 0,334$  para os dados de campo), legitimando novamente o uso do teste  $t$  pareado. O teste resultou em  $p = 0,081$ , acima do nível de significância de 5%; assim, não se rejeita a hipótese nula, inferindo-se que não há diferença estatisticamente significativa entre os métodos e validando o modelo de simulação proposto.

### **4.8.3 Comparação entre os dados de uniformidade para múltiplos entupimentos**

A comparação entre os cenários de entupimento realizados em campo com os simulados (para condições considerando e não considerando o ajuste de reposição

volumétrica) utilizou-se regressão forçada à origem e teste da hipótese nula ao nível de 5%.

Para comparação dos dados em ambas condições de ajuste, os coeficientes angulares não diferiram estatisticamente de 1; contudo, o ajuste com reposição volumétrica apresentou menor variabilidade residual e um coeficiente mais próximo da proporcionalidade ideal.

## 4.9. Produtividade do milho

### 4.9.1 CUC e as perdas de produtividade em cenários de entupimento

Para analisar o efeito dos entupimentos na produtividade do milho, determinou-se o ponto ótimo de produtividade a partir da equação de Freitas et al. (2003), aplicada ao município de Coimbra-MG em sistema apresentando boas condições de uniformidade por Mantovani (2001). Complementarmente, a avaliação do impacto financeiro utilizou a base de dados do CEPEA, adotando-se a cotação do milho em 06/11/2025. A Tabela 28 apresenta os parâmetros de referência utilizados como base para as estimativas de produtividade e de impacto econômico nos cenários de entupimento dos emissores.

Tabela 28 – Dados predecessores para análise do impacto de entupimento na produtividade do milho para o município de Coimbra-MG

<b>Lâmina ótima (mm)</b>	<b>Produtividade ótima (<math>kg\ ha^{-1}</math>)</b>	<b>Preço da Saca de 60Kg (R\$)</b>	<b>Preço por Quilograma (kg)</b>
431,038	6.854,700	66,850	1,114

Fonte: CEPEA (2025) e Freitas et al. (2003)

Utilizando-se as lâminas coletadas no teste de referência (média dos três testes sem entupimento), calculou-se a lâmina média dos coletores contidos nas áreas de influência dos emissores. De modo análogo, para os dados sob entupimento, foram utilizadas as lâminas provenientes dos testes de uniformidade com entupimento dos respectivos emissores.

A faixa molhada e o número de voltas do pivô necessárias para atingir a lâmina ótima foram então empregados no cálculo da produtividade correspondente ao cenário de entupimento de cada emissor. A Tabela 29 reúne os dados de lâmina e o pré-processamento que relaciona a lâmina coletada sem entupimento ao potencial

produtivo de cada emissor, sob condições de entupimento, destacando-se a exclusão do emissor 36 da análise.

Tabela 29 – Dados de entrada para cálculo da produtividade por um único emissor

<b>Emissor</b>	<b>Lâmina sem entupimento (mm)</b>	<b>Lâmina com entupimento (mm)</b>	<b>Faixa molhada (ha)</b>	<b>Número K de voltas para lâmina ótima</b>	<b>Lâmina Entupida da safra (mm)</b>
3	3,890	2,117	0,015	110,794	234,499
6	2,863	1,802	0,024	150,577	271,271
9	2,883	1,719	0,032	149,518	256,970
12	3,006	2,012	0,040	143,380	288,415
15	2,877	1,752	0,049	149,805	262,431
18	2,721	2,006	0,057	158,427	317,806
21	2,769	2,105	0,065	155,686	327,795
24	2,231	1,343	0,076	193,203	259,446
27	2,828	2,183	0,085	152,441	332,755
30	2,783	1,763	0,093	154,862	273,000
33	2,864	2,006	0,101	150,480	301,865

Fonte: Autor

A Tabela 30 apresenta a massa produzida na condição de lâmina ótima, a produtividade estimada pela equação de Freitas et al. (2003) para as lâminas sob entupimento, a massa produzida nessas condições, a diferença entre as massas na faixa molhada de cada emissor e, por fim, o prejuízo associado ao cenário de entupimento individual, obtido a partir da cotação do CEPEA. As perdas estimadas para cada emissor foram posteriormente somadas para compor o prejuízo total em todos os 2.047 cenários de entupimento processados.

Tabela 30 – Relação das massas produzidas e prejuízos para os cenários de entupimento de um único emissor

<b>Emissor</b>	<b>Massa produzida s/ entupimento (kg)</b>	<b>Produtividade (<math>kg\ ha^{-1}</math>)</b>	<b>Massa produzida c/ entupimento (kg)</b>	<b>Perda de massa por emissor (kg)</b>	<b>Prejuízo (R\$)</b>
3	105,821	2536,163	39,153	66,669	74,280
6	162,802	4000,957	95,024	67,778	75,516
9	219,783	3467,215	111,170	108,613	121,013
12	276,764	4580,550	184,943	91,821	102,303
15	333,744	3676,419	178,999	154,745	172,412
18	390,725	5421,278	309,019	81,707	91,035
21	447,706	5663,022	369,873	77,833	86,719
24	521,871	3562,906	271,256	250,615	279,227
27	579,757	5774,781	488,419	91,337	101,765

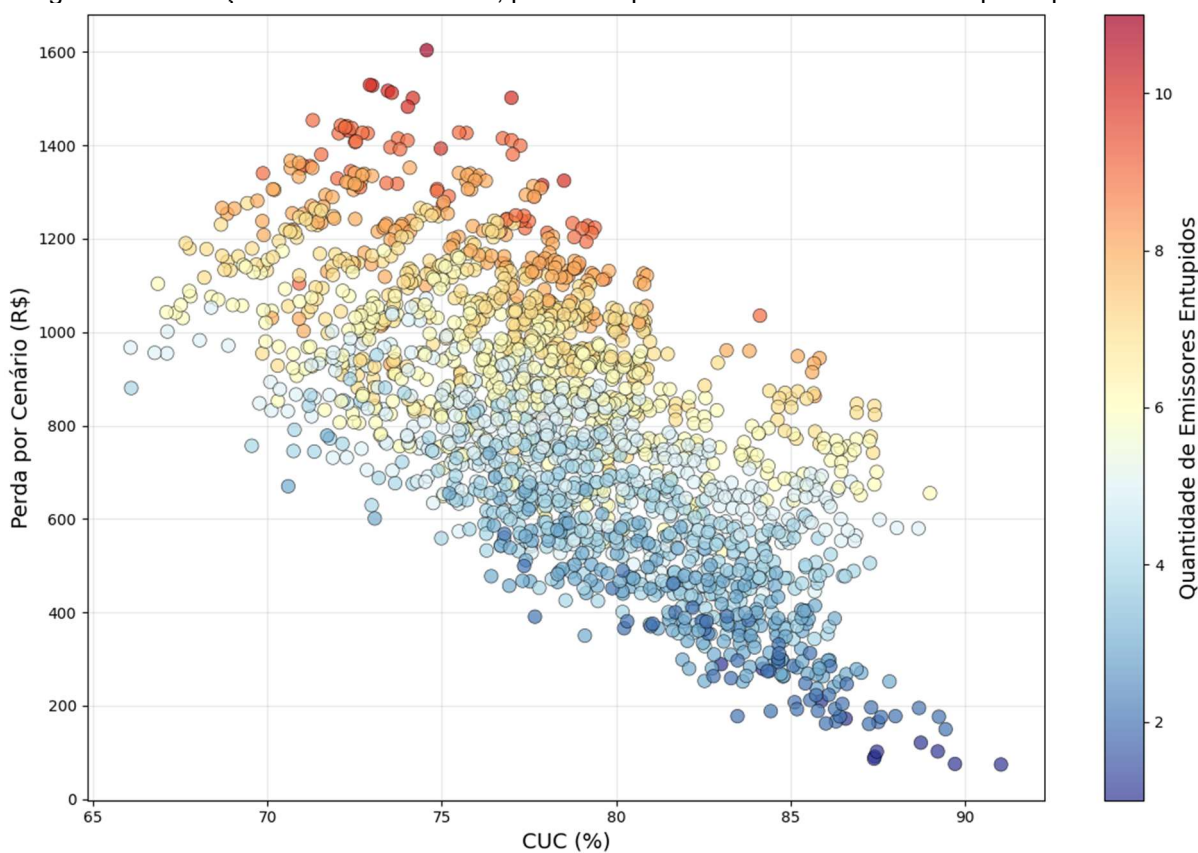
30	636,737	4062,397	377,359	259,379	288,991
33	693,718	4989,253	504,929	188,789	210,343

Fonte: Autor

As lâminas médias dos coletores contidos nas faixas molhadas dos emissores analisados apresentaram pequenas variações. Embora tais variações sejam usuais em sistemas de irrigação e afetem diretamente o cálculo de produtividade empregado neste estudo, sua magnitude é pouco expressiva sob a ótica hidráulica das vazões (KINCAID; HEERMANN, 1970).

O somatório das perdas nos 2.047 cenários permitiu avaliar a produtividade do milho em resposta a diferentes níveis de uniformidade, evidenciando uma relação direta com os impactos econômicos dos cenários de entupimento. Conforme ilustrado no gráfico de dispersão na Figura 33, o CUC apresenta associação visual com a perda financeira em cada cenário (R\$), e o *overlay* em mapa de calor identifica o número de emissores entupidos em cada cenário por meio da coloração dos pontos amostrais.

Figura 33 – Relação entre uniformidade, perdas e quantidade de emissores entupidos por cenário



Fonte: Autor

A dispersão evidencia a ocorrência de cenários com valores semelhantes de CUC associados a diferentes quantidades de emissores entupidos, reforçando que a quantidade, por si só, não determina o impacto na uniformidade. Observam-se, ainda, cenários atípicos com poucos emissores entupidos e baixa uniformidade, sugerindo influência marcante da posição radial e da combinação dos entupimentos.

Os dados também indicam heterocedasticidade, uma vez que a variabilidade das perdas aumenta de forma inversamente proporcional à uniformidade: quando o CUC é baixo, as perdas apresentam maior dispersão; à medida que a uniformidade cresce, as perdas se concentram em valores menores. Esse padrão sugere que baixos níveis de uniformidade podem elevar a incerteza econômica do sistema, ainda que o milho seja uma cultura que tem demonstrado boa rentabilidade quando irrigada na mesma área experimental e pelo mesmo dispositivo (OLIVEIRA et al., 2020).

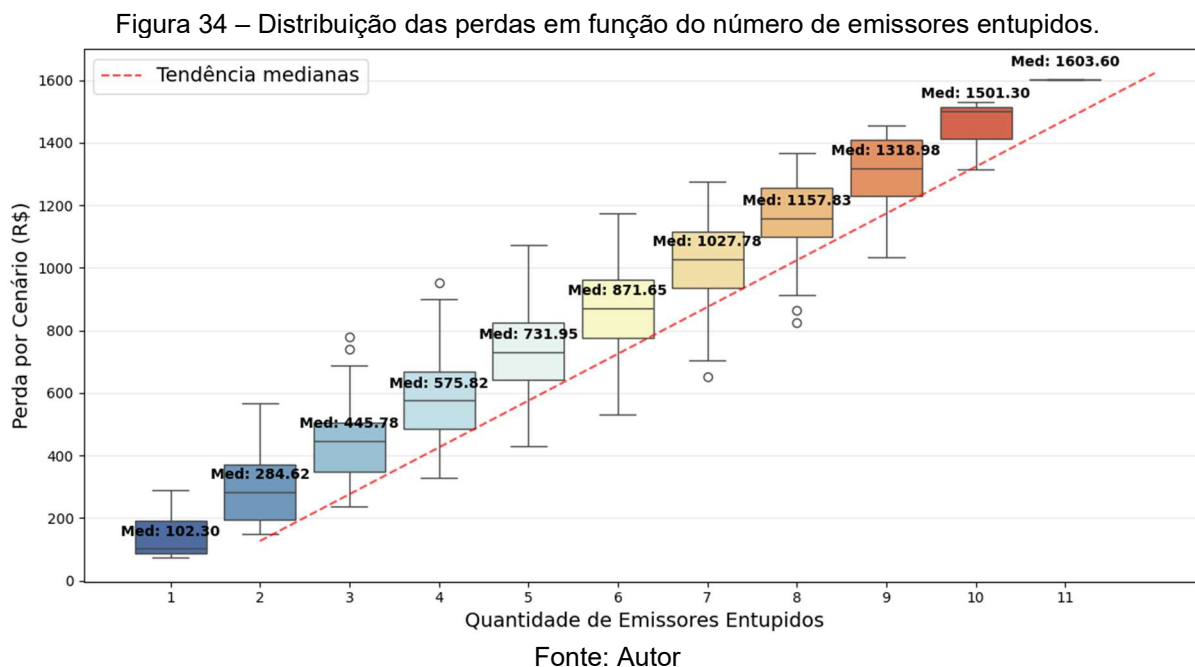
Nota-se ainda a formação de aglomerações de cenários em regiões específicas do plano (CUC, perda), como entre as coordenadas aproximadas (76; 500) e (84; 1000), além de um conjunto de cenários com melhor uniformidade (entre 84% e 90%) e perdas inferiores a R\$ 400,00 o que pode indicar regimes operacionais distintos associados à disposição dos entupimentos ao longo do sistema. Como exemplo, observa-se a concentração de cenários com mais de 9 entupimentos no intervalo de 65% a 80% de CUC; destaca-se que, nesses casos, aumenta a probabilidade de incluir emissores mais distantes do centro, com maior peso no cálculo da uniformidade.

De forma geral, a associação entre perdas financeiras e uniformidade é inversa: maiores valores de CUC correspondem sistematicamente a menores perdas, com uma nuvem de pontos inclinada do canto superior esquerdo (alta perda, baixa uniformidade) para o canto inferior direito (baixa perda, alta uniformidade).

#### **4.9.2 Milho: distribuição de perda por quantidade de emissores entupidos**

A quantidade de emissores entupidos apresenta associação mais nítida com as perdas financeiras do que a uniformidade isoladamente. A dispersão na Figura 33 sugere uma tendência aproximadamente proporcional entre as perdas e o número de emissores entupidos, com o mapa de cores indicando que cenários com maior número de entupimentos tendem a apresentar maiores perdas de produtividade. Para avaliar

essa relação, os cenários foram agrupados pela quantidade de emissores entupidos, e a Figura 34 apresenta a distribuição das perdas por grupo, destacando as medianas.



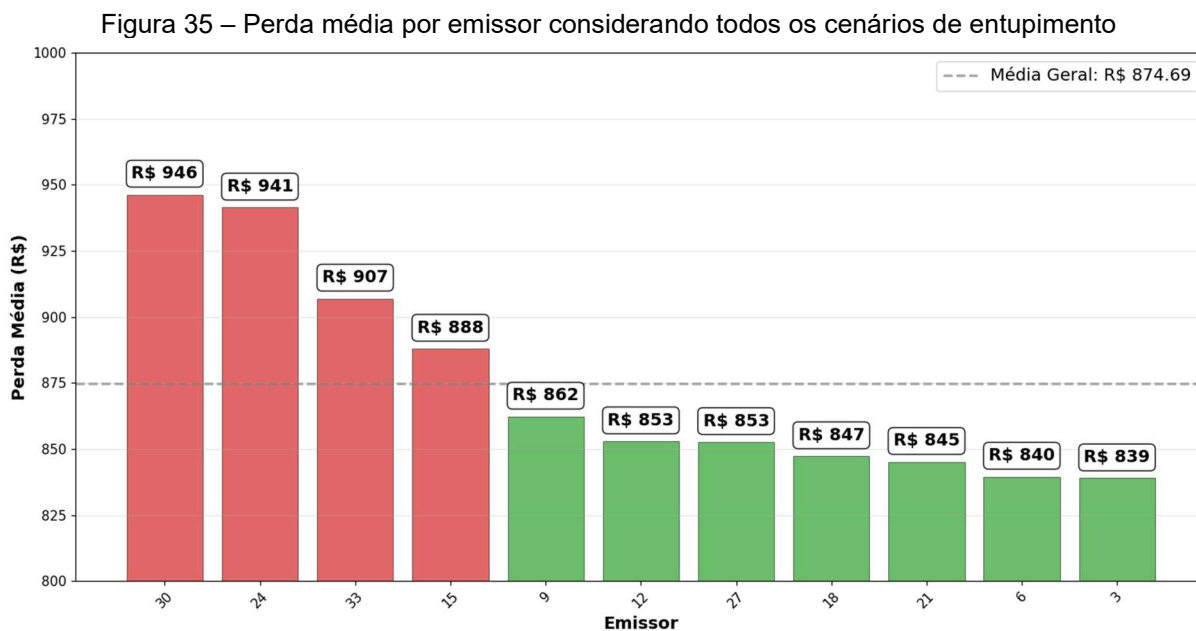
Embora existam cenários com perdas equivalentes associados a quantidades diferentes de emissores entupidos — e também situações em que poucos entupimentos geram perdas elevadas (e vice-versa), como indicam os *outliers* —, a tendência ascendente das medianas confirma o aumento das perdas à medida que aumenta o número de emissores entupidos.

Para os cenários com onze emissores entupidos, registrou-se a maior mediana, de R\$ 1.603,60. Ressalta-se que essas medianas são específicas do pivô central estudado em Coimbra–MG, de suas características dimensionais (2,14 ha) e de suas configurações operacionais.

#### 4.9.3 Milho: impacto na produtividade - perda média por emissor

Cada emissor foi avaliado considerando os 1.024 cenários em que esteve presente com entupimento. A Figura 35 apresenta a perda média por emissor, calculada a partir desses cenários, sem distinção entre os demais emissores simultaneamente entupidos em cada combinação. No gráfico, as colunas vermelhas representam emissores com perdas médias acima da média geral (referente ao

conjunto de cenários), enquanto as colunas verdes indicam valores abaixo dessa referência.



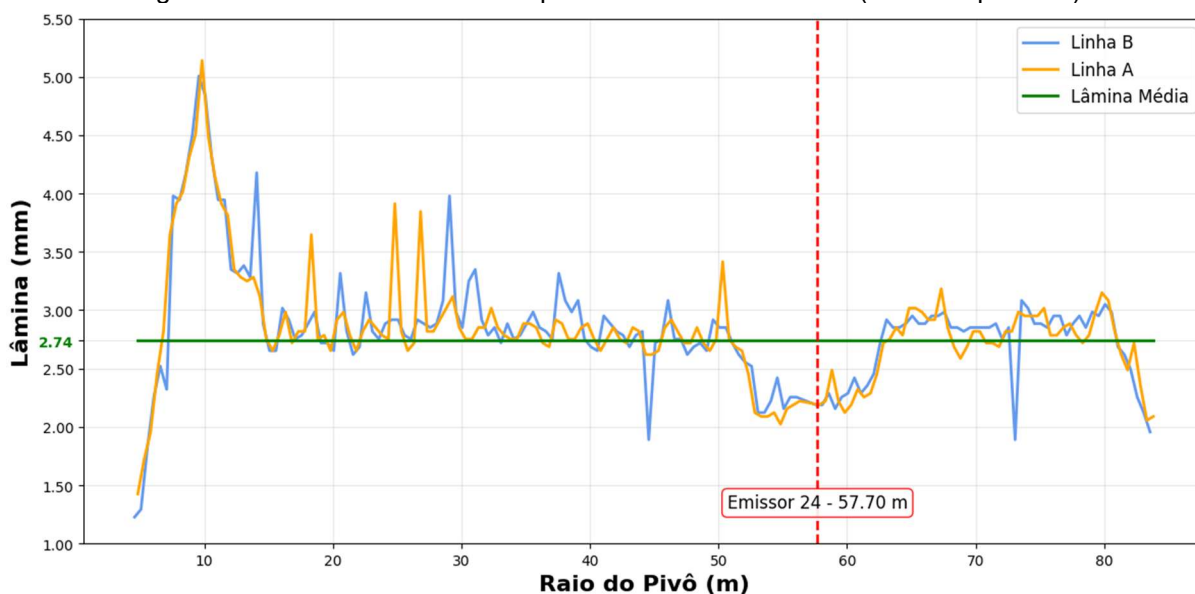
Fonte: Autor

Os emissores 30, 24, 33 e 15 apresentaram os maiores prejuízos médios, posicionando-se acima da média global. No caso dos emissores 30 e 33, ambos localizados na extremidade do pivô, esse comportamento é coerente com suas maiores faixas molhadas e, portanto, com maior potencial de perda absoluta. O destaque do emissor 24 relaciona-se principalmente à perda de massa: a diferença entre a massa produzida com lâmina ótima e a massa sob entupimento. Ao longo dos testes, os coletores na faixa molhada do emissor 24 receberam, em média, lâminas menores devido à proximidade com a torre móvel, onde um dos emissores vizinhos estava afastado aproximadamente ao dobro do padrão do sistema, reduzindo a sobreposição e elevando a variabilidade.

A variação espacial das lâminas é um fator prioritário no impacto da uniformidade, em comparação à lâmina média isoladamente (KELLER; BLIESNER, 1990). As figuras subsequentes (36 e 37) ilustram o perfil radial de lâmina em dois cenários extremos: o de referência (sem entupimento) e o com os 12 emissores experimentais entupidos. Em ambos, observa-se que os coletores no intervalo entre 55 m e 65 m do centro apresentaram lâminas abaixo da média, devido ao

posicionamento e a interferência estrutural associada à torre móvel, que afeta a sobreposição.

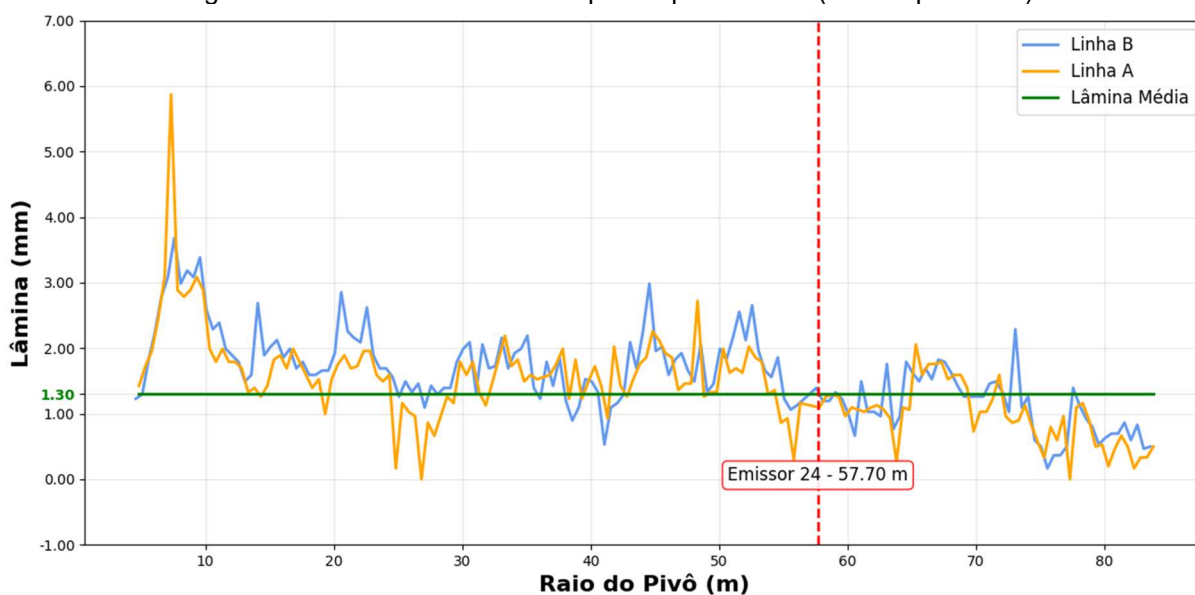
Figura 36 – Perfil radial de lâmina para cenário de referência (sem entupimento)



Fonte: Autor

A Figura 37 apresenta o perfil radial de lâmina para o cenário com os 12 emissores experimentais entupidos (pior cenário). É válido ressaltar a redução da lâmina média em 1,44 mm.

Figura 37 – Perfil radial de lâmina para o pior cenário (12 entupimentos)



Fonte: Autor

Os emissores 21 e 27 apresentaram as menores diferenças entre lâminas com e sem entupimento, o que contribui para sua posição abaixo da média geral de perdas. Ainda assim, por estarem associados a áreas molhadas relevantes, seus potenciais de perda permanecem relativamente elevados, mesmo com diferenças de lâmina pouco expressivas. Em contrapartida, os emissores 3, 6 e 15 seguem lógica inversa: embora 3 e 6 apresentem diferenças de lâmina maiores, suas áreas molhadas são consideravelmente menores, reduzindo o impacto econômico final. Já o emissor 15, por possuir área maior e diferença de lâmina comparável às de 3 e 6, apresentou perda média acima da referência.

Tabela 31 – Estimativa da média, desvio padrão e erro padrão da média das perdas médias dos respectivos emissores

<b>Emissor</b>	<b>Perda Média (R\$)</b>	<b>Desvio Padrão (R\$)</b>	<b>Erro Padrão da Média (R\$)</b>
30	946,30	231,65	7,239
24	941,42	234,62	7,332
33	906,97	251,97	7,874
15	888,01	259,08	8,096
9	862,31	266,26	8,321
12	852,95	268,22	8,382
27	852,68	268,27	8,383
18	847,32	269,23	8,413
21	845,16	269,59	8,425
6	839,56	270,43	8,451
3	838,94	270,52	8,454

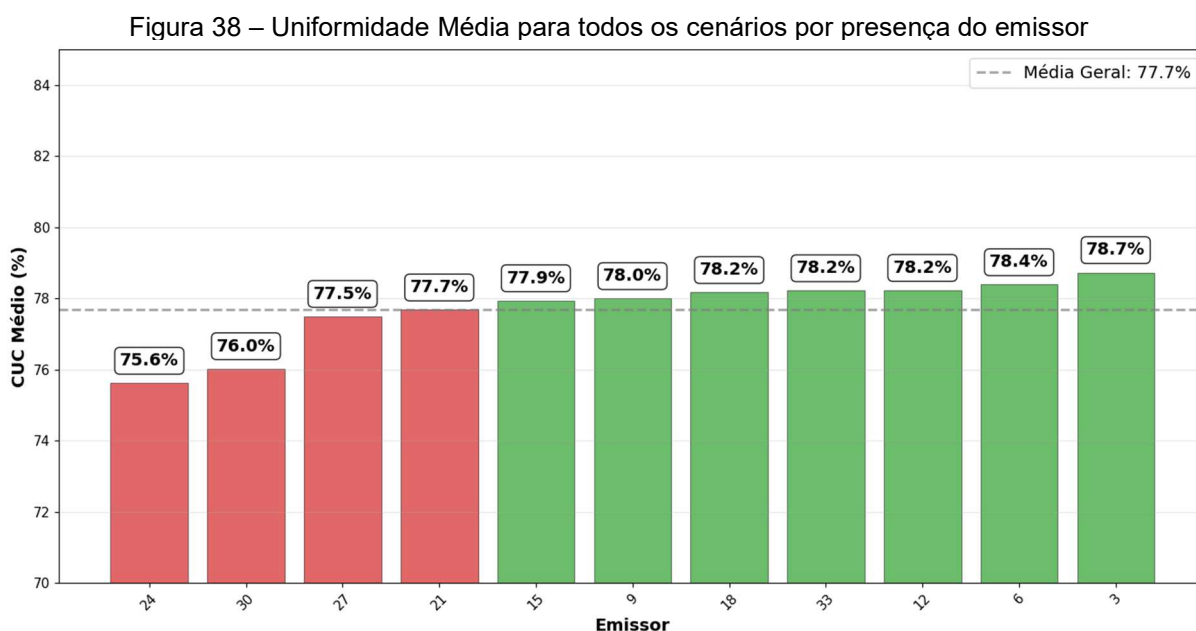
Fonte: Autor

A Tabela 31 evidencia diferenças na precisão das estimativas por emissor ao considerar o erro padrão da média. Apesar dessa variação, os valores de erro padrão são pequenos em relação às perdas médias, indicando boa precisão das simulações.

O emissor 30 apresentou o menor erro padrão da média, sugerindo que sua perda média é uma estimativa robusta e consistente, o que reforça a necessidade de priorizar intervenção nesse ponto do sistema. Por outro lado, o emissor 3, embora registre a menor perda média, apresentou o maior erro padrão, indicando maior variabilidade e menor precisão relativa. Isso sugere que, mesmo com média baixa, o comportamento da perda desse emissor ao longo dos cenários é mais instável e menos previsível.

#### 4.9.4 Milho: impacto na produtividade - uniformidade média por emissor

Ao considerar o Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC) médio nos 1.024 cenários em que cada emissor esteve presente — adotando o mesmo critério aplicado na comparação das perdas individuais por emissor — foi possível avaliar, de forma intrínseca, o efeito do entupimento de cada emissor sobre a uniformidade, sem condicioná-lo a interferências externas (como a deriva pelo vento). A Figura 38 apresenta a uniformidade média por emissor, bem como a média geral dos 2.047 cenários analisados.



Fonte: Autor

No conjunto analisado, entre os quatro emissores com CUC médio inferior à média geral, apenas um não pertence ao lance em balanço. Observou-se que, dos 11 emissores avaliados, 9 apresentaram diferenças percentuais inferiores a 1%, indicando variações relativamente pequenas entre as médias. Ainda assim, nota-se uma tendência de valores de uniformidade maiores para os emissores situados no início do sistema, sugerindo melhor desempenho relativo nessa região do pivô.

Para subsidiar a interpretação estatística desses resultados, a Tabela 32 apresenta o desvio padrão e o erro padrão da média associados às uniformidades médias por emissor.

Tabela 32 – Estimativa da média, desvio padrão e erro padrão da média das uniformidades médias dos respectivos emissores

<b>Emissor</b>	<b>CUC Médio (%)</b>	<b>Desvio Padrão (%)</b>	<b>Erro Padrão da Média (%)</b>
24	75,83	3,37	0,1053
30	76,27	3,53	0,1103
15	78,13	3,8	0,1187
21	78,34	4,01	0,1253
9	77,89	4,03	0,1259
18	78,19	4,07	0,1272
33	78,57	4,12	0,1288
12	78,42	4,15	0,1297
6	78,93	4,2	0,1313
3	78,43	4,58	0,1431
27	77,70	4,88	0,1525

Fonte: Autor

Ao analisar a confiabilidade das estimativas, observa-se que o emissor 24 apresenta, simultaneamente, o menor CUC médio e o menor erro padrão da média, o que indica que seu desempenho inferior em termos de uniformidade é consistente e robusto ao longo dos 1.024 cenários, reforçando sua caracterização como ponto crítico do sistema. Em contrapartida, o emissor 27 apresenta o maior erro padrão da média, embora seu CUC médio seja superior ao do emissor 24. Isso sugere que sua estimativa de desempenho é a mais variável e menos precisa entre os emissores, de modo que uma uniformidade média relativamente melhor vem acompanhada de maior incerteza estatística, refletindo um comportamento menos previsível ao longo dos cenários simulados.

De forma geral, os valores do erro padrão da média do CUC são baixos, o que reforça a robustez do conjunto amostral. Contudo, as diferenças observadas qualificam a interpretação: emissores com CUC baixo e erro padrão baixo indicam problemas crônicos e consistentes; por outro lado, emissores com CUC intermediário e erro padrão mais elevado podem representar falhas mais situacionais, potencialmente dependentes da configuração específica do cenário.

#### **4.9.5 Normalização para ponderações e score final**

A Tabela 33 apresenta a normalização dos dados de perda e uniformidade, permitindo identificar, com base em ponderação equilibrada, quais emissores são mais críticos para as condições operacionais do sistema. Esse resultado oferece

suporte direto para priorizar o acompanhamento e a manutenção preventiva dos emissores que exercem maior impacto simultâneo sobre a produtividade e a uniformidade.

Tabela 33 – Avaliação de prioridade preventiva para o pivô central de Coimbra-MG

<b>Emissor</b>	<b>Perda Média (R\$)</b>	<b>CUC Médio (%)</b>	<b>Perdas Normalizado</b>	<b>CUC Normalizado</b>	<b>Score Final</b>
24	941,42	75,83	0,955	1,000	0,977
30	946,30	76,27	1,000	0,858	0,929
33	906,97	78,43	0,634	0,161	0,397
15	888,01	78,13	0,457	0,258	0,358
27	852,68	77,70	0,128	0,397	0,262
9	862,31	78,19	0,218	0,239	0,228
21	845,16	77,89	0,058	0,335	0,197
12	852,95	78,42	0,130	0,165	0,148
18	847,32	78,34	0,078	0,190	0,134
6	839,56	78,57	0,006	0,116	0,061
3	838,94	78,93	0,000	0,000	0,000

Fonte: Autor

Como era esperado, o emissor 24 destacou-se como o mais crítico sob a ótica preventiva, por combinar a menor uniformidade média com perdas acima da média geral. O emissor 30, por sua vez, apresentou a maior perda média e a segunda menor uniformidade, o que o torna o segundo ponto mais crítico. Assim, 24 e 30 apresentaram os maiores valores de score, distinguindo-se expressivamente dos demais.

O emissor 33 configurou-se como ponto de transição no ranking: embora seja o terceiro mais crítico, sua uniformidade é consideravelmente superior à dos dois primeiros, apesar de apresentar perda relevante. Na sequência, os emissores 15, 27, 9, 21, 12, 18, 6 e 3 apresentaram redução gradual do score, indicando uma criticidade decrescente. Os emissores 6 e 3 apresentaram os menores scores, coerentemente associados à menor relevância relativa em função da área molhada.

#### **4.9.6 Comparativo entre as ponderações e análise da variabilidade**

A integração entre o erro padrão da média e o score final de criticidade fornece uma visão mais estratificada para a tomada de decisão em manutenção. Os emissores 24 e 30 constituem um primeiro patamar de ação imediata, ao combinarem scores elevados com baixa variabilidade (erros-padrão mais baixos em relação à média para

perdas e para CUC). Essa convergência indica não apenas maior impacto, mas também uma elevada confiança estatística nas estimativas, tornando a intervenção corretiva urgente e bem fundamentada — com atenção especial ao emissor 24, devido ao seu CUC consistentemente baixo.

Um segundo grupo — com os emissores 33, 15, 27, 9, 21, 12 e 18 — requer uma abordagem distinta, voltada à investigação diagnóstica. Esses emissores apresentam scores intermediários, porém se destacam por apresentarem erros-padrão maiores, com o emissor 27 evidenciando o maior erro-padrão médio para o CUC (0,1525). Esse padrão sugere que o impacto pode tornar-se elevado em condições específicas, não plenamente representadas pela média, o que caracteriza risco potencial subestimado. Nesses casos, recomenda-se uma verificação de campo mais detalhada antes de intervenções corretivas padronizadas.

Por fim, emissores 3 e 6, com scores próximos de zero, situam-se em um quadrante de monitoramento de rotina. Mesmo que o emissor 3 apresente maior erro padrão médio de perdas, seu impacto combinado é baixo, de modo que a incerteza associada tende a ser operacionalmente pouco relevante, permitindo programar a manutenção com baixa urgência.

Dessa forma, a análise conjunta do score e da variabilidade permite estruturar uma estratégia de gestão mais eficiente: ação imediata para os emissores 24 e 30; investigação específica para os emissores 9, 12, 15, 18, 21, 27 e 33 que podem ocultar falhas intermitentes; e programação rotineira para os demais. Essa abordagem transforma os resultados analíticos em um plano de ação orientado por impacto e por confiança estatística.

Recomenda-se, portanto, que estratégias preditivas de manutenção considerem não apenas os emissores distantes, mas também intensifiquem a investigação dos emissores próximos à torre, devido às defasagens de lâmina e aos seus efeitos sobre a uniformidade e a produtividade.

## 5. CONCLUSÕES

O CUC mostrou-se sensível ao entupimento de emissores no pivô central, sendo mais influenciado pela disposição espacial dos emissores entupidos do que pela quantidade total de entupimentos, o que explica a equivalência de uniformidade entre cenários com diferentes números de falhas.

Emissores próximos à torre móvel destacaram-se como pontos críticos, contribuindo para a redução do CUC e para perdas de produtividade, associadas a limitações de sobreposição.

A produtividade do milho apresentou tendência de redução com o aumento do número de emissores entupidos, sem reduzir a relevância do padrão espacial das falhas na interpretação da uniformidade.

Observou-se maior sensibilidade ao sentido do vento, condicionada ao posicionamento geográfico do sistema, do que à sua velocidade.

Entre as classificações operacionais avaliadas, Mantovani (2001) tende a subestimar cenários críticos, enquanto a ABNT (2016) mostrou maior adequação para categorizar o impacto do entupimento.

## REFERÊNCIAS

- ABD EL-WAHED, M. H.; SWELAM, A. **Performance assessment of center pivot irrigation system under arid area condition.** *Misr Journal of Agricultural Engineering*, v. 29, n. 4, p. 1515-1532, out. 2012. DOI: 10.21608/mjae.2012.101370.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). **ANA lança mapeamento com dados atualizados sobre agricultura irrigada por pivôs centrais no Brasil.** Brasília: ANA, 07 nov. 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/ana/pt-br/ana-lanca-mapeamento-com-dados-atualizados-sobre-agricultura-irrigada-por-pivos-centrais-no-brasil>. Acesso em: 22 jan. 2026.
- AGUIAR, J. V. de. **A função de produção na agricultura irrigada.** Fortaleza: Universidade Federal do Ceará, Imprensa Universitária, 2005. 196 p
- AL-GHOBARI, H. M. **Friction coefficient for center pivot systems.** *Journal of King Saud University: Engineering Sciences*, v. 7, n. 1, p. 139–149, 1995.
- ALTHOFF, D.; RODRIGUES, L. N. **The expansion of center-pivot irrigation in the cerrado biome.** *Irriga: Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Botucatu, v. 1, n. 1, p. 56–61, out. 2019. DOI: 10.15809/irriga.2019v1n1p56-61. Disponível em: <https://revistas.fca.unesp.br/index.php/irriga/article/view/3889>
- 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.
- ANDRADE, L. M.; DE OLIVEIRA, R. A.; DA CUNHA, F. F.; DRUMOND, L. C. D.; CECON, P. R.; DE OLIVEIRA, J. T.; ALEMAN, C. C. **Evaluation of collector spacing, positioning, and nozzle selection methods on water distribution uniformity in center pivots.** *PLOS ONE*, v. 20, n. 9, e0331122, 12 set. 2025. DOI: 10.1371/journal.pone.0331122. Disponível em: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0331122>
- 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.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14105-1:** Medidores analógicos de pressão com sensor de elemento elástico – Requisitos de fabricação, classificação, ensaios e utilização. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.
- BAIO, F. H. R.; SANTANA, D. C.; TEODORO, L. P. R.; OLIVEIRA, I. C.; GAVA, R.; OLIVEIRA, J. L. G.; SILVA JUNIOR, C. A.; TEODORO, P. E.; SHIRATSUCHI, L. S. **Maize yield prediction with machine learning, spectral variables and irrigation management.** *Remote Sensing*, v. 15, n. 1, p. 79, 2023. DOI: 10.3390/rs15010079.

BERNARDO, S.; MANTOVANI, E. C.; SILVA, D. D. da; SOARES, A. A. **Manual de irrigação**. 9. ed. Viçosa, MG: Editora UFV, 2019.

BRALTS, V. F.; WU, I.-P.; GITLIN, H. M. **Emitter plugging and drip irrigation lateral line hydraulics**. *Transactions of the ASAE*, v. 25, n. 5, p. 1274–1281, 1982.

BUCKS, D. A.; NAKAYAMA, F. S.; GILBERT, R. G. **Trickle irrigation water quality and preventive maintenance**. *Agricultural Water Management*, v. 2, p. 149–162, 1979.

CAMILO, J. A.; DE LELIS TEIXEIRA DE ANDRADE, C.; AMARAL, T. A.; TIGGES, C. H. P.; DE MELO, M. L. A.; CHAN, C. S.; GARCIA Y GARCIA, A. **Impact of climate change on maize grown in the Brazilian Cerrado**. In: *ASABE Annual International Meeting*, 2018, Detroit. *Proceedings...* St. Joseph, MI: American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2018. *Paper No.* 1800967. DOI: 10.13031/aim.201800967.

CALDARELLI, C. E.; BACCHI, M. R. P. **Fatores de influência no preço do milho no Brasil**. *Nova Economia*, v. 22, n. 1, p. 141–164, 2012. DOI: 10.1590/S0103-63512012000100005. Disponível em: <https://revistas.face.ufmg.br/index.php/novaeconomia/article/view/1669>

CAVALCANTE JUNIOR, E. G.; MEDEIROS, J. F.; FREITAS, I. A. S.; OLIVEIRA, A. K. S.; ESPÍNOLA SOBRINHO, J.; SILVA, J. P. N.; SILVA, T. G. F. **Necessidade hídrica da cultura do milho influenciada pelas mudanças climáticas no semiárido nordestino**. *Revista Brasileira de Milho e Sorgo*, v. 17, n. 2, p. 251–262, 2018. DOI: 10.18512/1980-6477/rbms.v17n2p251-262.

CENTRO DE ESTUDOS AVANÇADOS EM ECONOMIA APLICADA (CEPEA). **Indicador do milho ESALQ/BM&FBOVESPA**. Piracicaba: ESALQ/USP, 2025. Disponível em: <<https://www.cepea.org.br/br/indicador/milho.aspx>>. Acesso em: 11 nov. 2025.

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*, Basel, v. 14, n. 1, p. 47, 2024. DOI: 10.3390/agronomy14010047. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4395/14/1/47>

CHÁVEZ, J. L.; PIERCE, F. J.; EVANS, R. G. **Compensating inherent linear move water application errors using a variable-rate irrigation system**. *Irrigation Science*, v. 28, n. 3, p. 203–210, 2010. DOI: 10.1007/s00271-009-0188-6. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00271-009-0188-6>

CHEIN, F. **Introdução aos modelos de regressão linear: um passo inicial para compreensão da econometria como uma ferramenta de avaliação de políticas públicas**. Brasília: ENAP — Escola Nacional de Administração Pública, 2019. 76 p. ISBN 978-85-256-0115-5.

CHEN, F.; ZHAO, H.; ROBERTS, D.; VAN DE VOORDE, T.; BATELAAN, O.; FAN, T.; XU, W. **Mapping center pivot irrigation systems in global arid regions using**

**instance segmentation and analyzing their spatial relationship with freshwater resources.** *Remote Sensing of Environment*, v. 297, p. 113760, 2023. DOI: 10.1016/j.rse.2023.113760. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2023.113760>

CHRISTIANSEN, J. E. **Irrigation by sprinkling.** Berkeley: University of California, 1942. (Bulletin, 670).

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira — grãos: safra 2025/2026, 3º levantamento.** Brasília, DF: CONAB, 13 nov. 2025. Boletim de acompanhamento da safra de grãos, v.13, n.3. Disponível em: <https://www.gov.br/conab/pt-br/atuacao/informacoes-agropecuarias/safras/safra-de-graos/boletim-da-safra-de-graos>

CRITCHLEY, W.; SIEGERT, K. **A manual for the design and construction of water harvesting schemes for plant production.** Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 1991. Disponível em: <https://www.fao.org/3/U3160E/u3160e00.htm> Acesso em: 20 fev. 2026

DECHMI, F.; PLAYÁN, E.; CAVERO, J.; FACI, J.M.; MARTÍNEZ-COB, A. **Wind effects on solid set sprinkler irrigation depth and yield of maize (Zea mays).** *Irrigation Science*, v. 22, n. 2, p. 67–77, 2003.

DECHMI, F.; PLAYÁN, E.; FACI, J. M.; TEJERO, M. **Analysis of an irrigation district in northeastern Spain I. Characterisation and water use assessment.** *Agricultural Water Management*, v. 61, n. 2, p. 75–92, 2003.

DJAMAN, K.; O'NEILL, M.; OWEN, C. K.; SMEAL, D.; KOUDAHE, K.; WEST, M.; ALLEN, S.; LOMBARD, K.; IRMAK, S. **Crop evapotranspiration, irrigation water requirement and water productivity of maize from meteorological data under semiarid climate.** *Water*, v. 10, n. 4, p. 405, 2018. DOI: 10.3390/w10040405.

EL-WAHED, M. A.; SABAGH, A. E.; SANEOKA, H.; ABDELKHALEK, A. A.; BARUTÇULAR, C. **Sprinkler irrigation uniformity and crop water productivity of barley in arid region.** *Emirates Journal of Food and Agriculture*, v. 27, n. 10, p. 770–775, 2015. DOI: 10.9755/ejfa.2015-05-209.

FABRIS, D. N.; GOMES, E. P.; DA SILVA, C. J.; FLUMIGNAN, D. L.; MELLO, K. D. A.; SANCHES, A. C. **Effect of water supply and sowing dates on corn yield of hybrids grown during offseason.** *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, v. 43, n. 1, e20210020, 2023. DOI: 10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v43n1e20210020/2023.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO). **FAOSTAT: production – visual data.** Rome: FAO, 2025. Disponível em: <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL/visualize>. Acesso em: 29 dez. 2025.

FARIA, L. C.; BESKOW, S.; COLOMBO, A.; NÖRENBERG, B. G.; NETO, O. R.; SIMÕES, M. C. **Influência do vento na uniformidade de aplicação de água de um equipamento de irrigação mecanizada tipo lateral móvel usando emissores de placa oscilante.** *Ciência Rural*, v. 46, n. 1, p. 83–88, 2016. DOI: 10.1590/0103-8478cr20141558.

FIGUERÊDO, S. F.; POZZEBON, E. J.; FRIZZONE, J. A.; AZEVEDO, J. A. de; GUERRA, A. F.; MEDRADO DA SILVA, E. **Gerenciamento da irrigação do feijoeiro baseado em critérios técnicos e econômicos no Cerrado.** *Irriga*, Botucatu, v. 13, n. 3, p. 378–391, 2008.

FREITAS, P. S. L.; REZENDE, R.; MANTOVANI, E. C.; FRIZZONE, J. A. **Viabilidade de inserção dos efeitos da uniformidade de irrigação em modelos de crescimento de culturas.** *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v. 7, n. 3, p. 437–444, 2003. Disponível em: <http://www.agriambi.com.br>

FRIZZONE, J. A.; ANDRADE JÚNIOR, A. S. (Eds.). **Planejamento de irrigação: análise de decisão de investimento.** Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2005. 626 p.

GARCIA, J. C.; MATTOSO, M. J.; DUARTE, J. de O. **Cultivo do milho no sistema plantio direto: importância do milho em Minas Gerais.** *Informe Agropecuário*, Belo Horizonte, v. 27, n. 233, p. 7–12, 2006. Disponível em: <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/490196>

GAVA, R.; SNYDER, R. L.; FRIZZONE, J. A.; KÜHN, I. E.; COTRIM, M. F.; PIATI, G. L. **Maize second season irrigated by center pivot in sandy soil.** *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada*, Campina Grande, v. 12, n. 2, p. 2554–2560, 2018. DOI: 10.7127/rbai.v12n200825.

GONZÁLEZ-SÁNCHEZ, A.; FRAUSTO-SOLÍS, J.; OJEDA-BUSTAMANTE, W. **Predictive ability of machine learning methods for massive crop yield prediction.** *Spanish Journal of Agricultural Research*, v. 12, n. 2, p. 313–328, 2014. DOI: 10.5424/sjar/2014122-4439.

GUIMARÃES, D. P.; LANDAU, E. C. **Georreferenciamento dos pivôs centrais de irrigação no Brasil: ano base 2020.** *Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento 222*, Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG, dez. 2020. ISSN 1679-0154. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1128368/1/Bol-222.pdf>

GREEN, D.; PATTISON, I. **Christiansen uniformity revisited: re-thinking uniformity assessment in rainfall simulator studies.** *Catena*, v. 217, p. 106424, 2022. DOI: 10.1016/j.catena.2022.106424.

HANSON, B. R.; ORLOFF, S. B. **Rotator nozzles more uniform than spray nozzles on center-pivot sprinklers.** *California Agriculture*, v. 50, n. 1, p. 32–35, 1996. DOI: 10.3733/ca.v050n01p32. Disponível em: <https://doi.org/10.3733/ca.v050n01p32>

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

HEINEMANN, A. B.; FRIZZONE, J. A.; PINTO, J. M.; FEITOSA FILHO, J. C. **Influência da altura do emissor na uniformidade de distribuição da água de um**

**sistema pivô central.** *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, [S. l.], v. 33, n. 9, p. 1487–1491, 1998. DOI: 10.1590/S1678-3921.pab1998.v33.4984. Disponível em: <https://apct.sede.embrapa.br/pab/article/view/4984>.

HOWES, D. J.; ELLENSON, S.; HOFFMANN, L.; GAUDI, F. **Center pivot sprinkler distribution uniformity impacts on the spatial variability of evapotranspiration.** *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, v. 141, n. 8, 2015. DOI: 10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000851.

JENSEN, M. E. **Beyond irrigation efficiency.** *Irrigation Science*, v. 25, n. 3, p. 233–245, 2007. DOI: 10.1007/s00271-007-0060-5.

KELLER, J.; BLIESNER, R. D. **Sprinkle and trickle irrigation.** New York: Springer-US, 1990, 659p. DOI: 10.1007/978-1-4757-1425-8.

KINCAID, D. C. **Application uniformity of low pressure center pivot equipment.** *Proceedings of the Winter Commodity Schools*, 1996, Burley, v. 28. University of Idaho Cooperative Extension System, 1996, p. 91–93.

KINCAID, D. C.; HEERMANN, D. F. **Pressure distribution on a center-pivot sprinkler irrigation system.** *Transactions of the ASAE*, v. 13, n. 5, p. 556–558, 1970.

LI, J. **Modeling crop yield as affected by uniformity of sprinkler irrigation system.** *Agricultural Water Management*, v. 38, p. 135–146, 1998.

MANTOVANI, E. C. **Avalia: Programa de avaliação da irrigação por aspersão e localizada.** Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, 2001.

MANTOVANI, E. C.; MONTES, D. R. P.; VIEIRA, G. H. S.; RAMOS, M. M.; SOARES, A. A. **Estimativa de produtividade da cultura do feijão irrigado em Cristalina-GO, para diferentes lâminas de irrigação como função da uniformidade de aplicação.** *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, v. 32, n. 1, p. 110–120, 2012.

MANTOVANI, E. C.; VILLALOBOS, F. J.; ORGAZ, F.; FERERES, E. **Modelling the effects of sprinkler irrigation uniformity on crop yield.** *Agricultural Water Management*, v. 27, p. 243–257, 1995.

MATEOS, L. **A simulation study of comparison of the evaluation procedures for three irrigation methods.** *Irrigation Science*, v. 25, n. 1, p. 75–83, 2006.

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

MENG, L.; LIU, H.; USTIN, S. L.; ZHANG, X. **Predicting maize yield at the plot scale of different fertilizer systems by multi-source data and machine learning methods.** *Remote Sensing*, v. 13, n. 18, p. 3760, 2021. DOI: 10.3390/rs13183760.

MERON, M.; PERES, M.; LEVIN-ORLOV, V.; SHOSHANI, G.; MARCHAIM, U.; CHEN, A. **Irrigation uniformity assessment with high-resolution aerial sensors.**

International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, v. 122, p. 103364, 2025.

MOHAMMED, A. S.; MOHAMED, O.; AL NAJJAR, A.; AWWAD, A. H. **Maximizing the benefit of old center pivot irrigation systems in Egypt.** *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, v. 12, n. 11, 2023. ISSN 2278-0181. Disponível em: <http://www.ijert.org>

MORENO, M. A.; MEDINA, D.; ORTEGA, J. F.; TARJUELO, J. M. **Optimal design of center pivot systems with water supplied from wells.** *Agricultural Water Management*, v. 107, p. 112–121, 2012. DOI: 10.1016/j.agwat.2012.01.016.

MAROUFPOOR, E.; FERREYDOUNI, M.; GANJALI, A.; MAROUFPOOR, S. **Evaluation of uniformity coefficients for sprinkler irrigation systems under different field conditions in Kurdistan Province, Northwest of Iran.** *Soil and Tillage Research*, v. 109, n. 2, p. 198–205, 2010. DOI: 10.1016/j.still.2010.05.004.

NAKAYAMA, F. S.; BUCKS, D. A. **Emitter clogging effects on trickle irrigation uniformity.** *Transactions of the ASAE*, v. 24, n. 1, p. 77–80, 1981.

OLIVEIRA BATISTA, R.; SOARES, A. A.; MATOS, A. T.; MANTOVANI, E. C. **Suscetibilidade ao entupimento de gotejadores mediante a aplicação de esgoto sanitário tratado.** *Engenharia na Agricultura, Viçosa*, v. 14, n. 2, p. 81–87, 2006.

OLIVEIRA, J. D.; OLIVEIRA, R. D.; OLIVEIRA, R. D.; OLIVEIRA, E. D.; BOTELHO, M. E.; FERREIRA, P. M. O. **Viabilidade econômica de irrigação por pivô central em pequenas áreas cultivadas com feijão, soja e milho.** *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada*, v. 14, n. 4, p. 4171–4179, 2020.

OUAZAA, S.; LATORRE, B.; BURGUETE, J.; SERRETA, A.; PLAYÁN, E.; SALVADOR, R.; PANIAGUA, P.; ZAPATA, N. **Effect of the start-stop cycle of center-pivot towers on irrigation performance: experiments and simulations.** *Agricultural Water Management*, v. 147, p. 163–174, 2015. DOI: 10.1016/j.agwat.2014.05.013.

PLAYÁN, E.; GARRIDO, S.; FACI, J. M.; GALÁN, A. **Characterizing pivot sprinklers using an experimental irrigation machine.** *Agricultural Water Management*, v. 70, n. 3, p. 177–193, 2004. DOI: 10.1016/j.agwat.2004.06.004.

SANCHEZ, I.; ZAPATA, N.; FACI, J. M.; MARTÍNEZ-COB, A. **The spatial variability of the wind in a sprinkler irrigated district: implications for irrigation management.** *Biosystems Engineering*, v. 109, n. 1, p. 65–76, 2011.

SANO, E. E.; MAGALHÃES, I. A. L.; RODRIGUES, L. N.; BOLFE, É. L. **Spatio-temporal dynamics of center pivot irrigation systems in the Brazilian tropical savanna (1985–2020).** *Water*, v. 16, n. 13, 2024. DOI: 10.3390/w16131897.

SHAHHOSSEINI, M.; HU, G.; ARCHONTOULIS, S. V. **Forecasting corn yield with machine learning ensembles.** *Frontiers in Plant Science*, v. 11, p. 1120, 2020. DOI: 10.3389/fpls.2020.01120.

SILVEIRA, P.; STONE, L. F. **Irrigação**. In: *Feijão de alta produtividade. Informe Agropecuário*, Belo Horizonte, v. 25, n. 223, p. 74–82, 2004.

SOUZA, A. E.; REIS, J. G. M. dos; RAYMUNDO, J. C.; PINTO, R. S. **Estudo da produção do milho no Brasil**. *South American Development Society Journal*, v. 4, n. 11, p. 182–194, 2018. DOI: 10.24325/issn.2446-5763.v4i11p182-194.

SOUZA, P. V. D.; REZENDE, L. P.; DUARTE, A. P.; MIRANDA, G. V. **Maize yield prediction using artificial neural networks based on a trial network dataset**. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, v. 13, n. 2, p. 10338–10346, 2023. DOI: 10.48084/etasr.5664

SOUZA, R. F. de; BARROS, A. C.; BARROS, A. H. C.; TABOSA, J. N. **Estimates for maize yield (*Zea mays* L.) in rainfed and irrigated crops determined by the method of agroecological zone/FAO (ZAE/FAO), state of Alagoas, Brazil**. *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada*, v. 8, n. 2, p. 127–138, 2014. DOI: 10.7127/rbai.v8n200231.

TAYLOR, H. D.; BASTOS, R. K. X.; PEARSON, H. W.; MARA, D. D. **Drip irrigation with waste stabilisation pond effluents: solving the problem of emitter fouling**. *Water Science and Technology*, v. 31, n. 12, p. 417–424, 1995. DOI: 10.1016/0273-1223(95)00528-U. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0273-1223\(95\)00528-U](https://doi.org/10.1016/0273-1223(95)00528-U)

TIAN, F.; WU, B.; ZENG, H.; ZHANG, M.; ZHU, W.; YAN, N.; LU, Y.; LI, Y. **GMIE: a global maximum irrigation extent and central pivot irrigation system dataset derived via irrigation performance during drought stress and deep learning methods**. *Earth System Science Data*, v. 17, n. 3, p. 855–880, 2025. DOI: 10.5194/essd-17-855-2025.

WANG, X.; MÜLLER, C.; ELLIOT, J.; MUELLER, N. D.; CIAIS, P.; JÄGERMEYR, J.; GERBER, J.; DUMAS, P.; WANG, C.; YANG, H.; LI, L.; DERYNG, D.; FOLBERTH, C.; LIU, W.; MAKOWSKI, D.; OLIN, S.; PUGH, T. A. M.; REDDY, A.; SCHMID, E.; PIAO, S. **Global irrigation contribution to wheat and maize yield**. *Nature Communications*, v. 12, n. 1, 2021. DOI: 10.1038/s41467-021-21498-5.

WU, B.; TIAN, F.; ZHANG, M.; PIAO, S.; ZENG, H.; ZHU, W.; LIU, J.; ELNASHAR, A.; LU, Y. **Quantifying global agricultural water appropriation with data derived from earth observations**. *Journal of Cleaner Production*, v. 358, 2022. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.131891.

YAVUZ, M. Y.; DEMİREL, K.; ERKEN, O.; BAHAR, E.; DEVECİLER, M. **Emitter clogging and effects on drip irrigation systems performances**. *African Journal of Agricultural Research*, v. 5, n. 7, p. 532–538, 2010. DOI: 10.5897/AJAR2010.948. Disponível em: <http://www.academicjournals.org/AJAR>

## APÊNDICE A - Notas

Tabela 34 – Volumes coletados e as respectivas médias por coletor para testes sem entupimento de emissores

Linha A					Linha B				
Coletor	CUC QT1	CUC QT2	CUC QT3	Média	Coletor	CUC QT1	CUC QT2	CUC QT3	Média
1	7,5	8,0	6,0	7,167	1	5,0	8,0	5,5	6,167
2	8,5	9,0	8,5	8,667	2	5,5	8,0	6,0	6,500
3	9,5	11,0	9,0	9,833	3	9,0	10,0	8,5	9,167
4	12,0	13,5	11,5	12,333	4	11,5	13,0	9,5	11,333
5	13,5	15,5	13,5	14,167	5	12,5	14,0	11,5	12,667
6	17,5	20,0	17,5	18,333	6	5,0	16,5	13,5	11,667
7	20,0	20,5	18,5	19,667	7	18,5	23,5	18,0	20,000
8	19,0	21,5	20,0	20,167	8	18,5	21,5	19,5	19,833
9	22,5	22,5	20,0	21,667	9	20,0	22,5	20,5	21,000
10	22,0	23,5	22,5	22,667	10	22,5	23,0	22,5	22,667
11	25,0	27,0	25,5	25,833	11	23,5	26,0	26,0	25,167
12	22,0	22,5	23,0	22,500	12	24,5	24,0	24,5	24,333
13	20,5	20,5	21,5	20,833	13	21,0	21,5	22,5	21,667
14	18,5	20,0	20,5	19,667	14	19,0	20,5	20,0	19,833
15	18,5	19,5	19,5	19,167	15	19,5	19,5	20,5	19,833
16	15,5	16,5	18,5	16,833	16	17,5	15,5	17,5	16,833
17	16,0	17,5	16,0	16,500	17	16,0	17,0	17,0	16,667
18	16,5	16,0	16,5	16,333	18	16,5	18,0	16,5	17,000
19	16,0	15,5	18,0	16,500	19	16,0	16,5	17,0	16,500
20	15,5	15,0	16,5	15,667	20	15,5	26,0	21,5	21,000
21	13,5	13,5	14,5	13,833	21	14,5	14,0	15,0	14,500
22	13,0	14,0	13,0	13,333	22	12,5	14,0	13,5	13,333
23	13,5	15,0	13,5	14,000	23	12,0	14,0	14,0	13,333
24	14,0	15,0	16,0	15,000	24	14,0	15,5	16,0	15,167
25	12,5	14,5	14,0	13,667	25	13,0	15,0	16,0	14,667
26	12,5	15,0	15,0	14,167	26	12,0	14,5	15,0	13,833
27	13,0	14,5	15,0	14,167	27	12,5	14,5	15,0	14,000
28	18,5	16,0	20,5	18,333	28	13,5	14,5	15,5	14,500
29	13,5	13,5	14,5	13,833	29	14,5	15,5	15,0	15,000
30	13,5	14,5	14,0	14,000	30	13,5	14,0	13,5	13,667
31	12,5	14,0	13,5	13,333	31	12,5	14,0	14,5	13,667
32	13,5	15,0	15,5	14,667	32	11,5	14,0	14,5	13,333
33	14,0	15,0	16,0	15,000	33	19,5	14,5	16,0	16,667
34	13,5	14,5	14,0	14,000	34	13,5	14,0	15,0	14,167
35	13,0	13,5	13,5	13,333	35	12,5	13,5	13,5	13,167
36	13,5	14,5	14,5	14,167	36	12,0	14,0	14,5	13,500
37	14,5	15,0	14,5	14,667	37	13,0	19,5	15,0	15,833
38	14,5	14,0	14,5	14,333	38	14,0	14,5	14,0	14,167
39	14,0	13,5	14,5	14,000	39	13,5	14,0	14,0	13,833
40	14,0	14,0	13,5	13,833	40	14,0	14,5	15,0	14,500

41	18,0	17,0	24,0	19,667	41	14,5	14,5	15,0	14,667
42	14,0	13,5	15,0	14,167	42	13,5	15,5	15,0	14,667
43	13,5	13,0	13,5	13,333	43	14,0	13,5	14,5	14,000
44	13,0	14,0	14,0	13,667	44	13,0	15,0	13,5	13,833
45	18,5	18,5	21,0	19,333	45	14,0	15,0	15,0	14,667
46	14,0	14,0	14,5	14,167	46	14,5	14,5	14,5	14,500
47	14,5	14,0	14,0	14,167	47	14,0	14,5	14,5	14,333
48	14,5	15,0	14,5	14,667	48	13,5	16,0	14,0	14,500
49	15,0	15,5	15,0	15,167	49	14,0	16,0	16,5	15,500
50	16,0	15,5	15,5	15,667	50	21,5	15,0	23,5	20,000
51	14,0	14,5	14,5	14,333	51	15,5	14,0	15,5	15,000
52	14,5	13,5	13,5	13,833	52	14,0	14,0	15,0	14,333
53	13,5	14,5	13,5	13,833	53	13,5	20,5	15,0	16,333
54	14,0	14,5	14,5	14,333	54	14,5	15,5	20,5	16,833
55	13,5	15,0	14,5	14,333	55	14,0	14,5	15,5	14,667
56	16,0	14,0	15,5	15,167	56	13,0	14,5	14,5	14,000
57	14,0	15,0	14,0	14,333	57	13,5	15,0	14,5	14,333
58	14,0	15,0	13,0	14,000	58	12,5	14,5	14,0	13,667
59	13,5	14,0	14,0	13,833	59	14,0	14,5	15,0	14,500
60	12,5	15,0	14,0	13,833	60	13,5	14,5	13,5	13,833
61	14,0	15,0	14,5	14,500	61	13,5	15,0	13,5	14,000
62	14,0	14,5	15,0	14,500	62	14,5	14,0	15,0	14,500
63	14,0	15,0	14,0	14,333	63	16,5	14,5	14,0	15,000
64	13,0	15,0	13,0	13,667	64	14,5	14,5	14,0	14,333
65	13,5	14,0	13,0	13,500	65	14,5	14,5	13,5	14,167
66	14,0	15,0	15,0	14,667	66	12,5	15,0	14,0	13,833
67	14,5	14,5	14,5	14,500	67	19,0	14,5	16,5	16,667
68	13,0	14,0	14,5	13,833	68	14,0	17,0	15,5	15,500
69	13,5	14,0	14,0	13,833	69	14,5	14,5	16,0	15,000
70	14,0	14,5	14,5	14,333	70	14,0	18,5	14,0	15,500
71	15,0	14,5	14,0	14,500	71	13,5	14,0	14,0	13,833
72	15,0	13,0	13,5	13,833	72	14,5	12,0	14,0	13,500
73	13,0	13,5	13,5	13,333	73	13,5	14,0	12,5	13,333
74	13,0	14,5	14,0	13,833	74	13,5	15,5	15,5	14,833
75	14,0	14,5	14,5	14,333	75	14,0	14,0	15,5	14,500
76	13,5	14,0	14,0	13,833	76	15,0	13,0	14,5	14,167
77	13,0	14,0	14,0	13,667	77	13,5	14,5	14,0	14,000
78	14,0	14,5	14,5	14,333	78	12,5	14,0	14,0	13,500
79	14,5	13,5	14,5	14,167	79	14,0	13,0	15,0	14,000
80	13,5	13,0	13,0	13,167	80	15,0	13,5	14,0	14,167
81	13,5	13,0	13,0	13,167	81	0,5	14,0	14,0	9,500
82	13,5	13,0	13,5	13,333	82	14,0	13,5	13,5	13,667
83	14,5	14,5	14,0	14,333	83	13,0	14,5	14,0	13,833
84	14,5	15,5	14,0	14,667	84	16,5	14,0	16,0	15,500
85	13,0	15,0	14,5	14,167	85	13,5	13,0	15,0	13,833
86	13,5	13,5	14,0	13,667	86	14,0	12,5	15,0	13,833
87	14,0	12,5	14,5	13,667	87	13,5	13,0	13,0	13,167
88	15,5	13,5	14,0	14,333	88	13,5	13,5	13,5	13,500

89	13,0	14,0	14,0	13,667	89	14,5	13,0	13,5	13,667
90	13,5	13,5	13,0	13,333	90	13,0	14,0	13,0	13,333
91	14,0	13,5	14,0	13,833	91	14,5	14,0	15,5	14,667
92	17,5	15,5	18,5	17,167	92	14,5	13,5	15,0	14,333
93	14,5	13,0	14,0	13,833	93	15,5	13,0	14,5	14,333
94	14,5	12,5	13,5	13,500	94	15,0	12,0	14,0	13,667
95	14,5	13,0	12,5	13,333	95	14,0	12,0	13,5	13,167
96	13,0	11,5	12,5	12,333	96	14,5	10,5	13,5	12,833
97	11,5	10,0	10,5	10,667	97	15,5	10,5	12,0	12,667
98	10,0	11,0	10,5	10,500	98	10,5	10,5	11,0	10,667
99	10,5	10,5	10,5	10,500	99	11,0	10,5	10,5	10,667
100	10,5	10,5	11,0	10,667	100	11,0	11,5	11,0	11,167
101	10,0	11,0	9,5	10,167	101	14,5	11,0	11,0	12,167
102	11,0	11,0	10,5	10,833	102	10,5	11,0	11,0	10,833
103	11,5	11,0	10,5	11,000	103	11,5	11,0	11,5	11,333
104	11,0	11,0	11,5	11,167	104	12,0	11,5	10,5	11,333
105	11,0	11,0	11,0	11,000	105	10,5	11,5	11,0	11,000
106	11,5	10,5	11,5	11,167	106	10,5	11,0	11,5	11,000
107	13,5	11,0	13,0	12,500	107	11,5	11,5	11,5	11,500
108	11,5	11,5	10,5	11,167	108	11,5	11,0	10,0	10,833
109	11,5	11,0	9,5	10,667	109	11,5	11,5	11,0	11,333
110	11,5	11,0	10,5	11,000	110	10,5	12,0	12,0	11,500
111	12,0	11,5	11,5	11,667	111	11,5	12,0	13,0	12,167
112	11,5	11,0	11,5	11,333	112	12,0	12,5	10,0	11,500
113	12,0	12,0	10,5	11,500	113	11,5	13,0	11,0	11,833
114	12,0	13,5	11,5	12,333	114	11,0	14,5	11,5	12,333
115	12,0	15,0	14,0	13,667	115	12,0	15,5	13,5	13,667
116	13,0	14,5	14,0	13,833	116	14,5	15,0	14,5	14,667
117	13,5	15,5	14,0	14,333	117	15,0	13,5	14,5	14,333
118	14,5	14,0	13,5	14,000	118	15,0	14,5	13,5	14,333
119	15,5	14,5	15,5	15,167	119	15,0	15,0	13,5	14,500
120	15,5	15,0	15,0	15,167	120	14,0	15,0	15,5	14,833
121	15,0	15,0	15,0	15,000	121	14,5	14,5	14,5	14,500
122	15,0	14,0	15,0	14,667	122	15,0	14,0	14,5	14,500
123	15,5	14,5	14,0	14,667	123	15,5	15,0	14,0	14,833
124	17,0	14,5	16,5	16,000	124	15,0	15,0	14,5	14,833
125	14,5	14,5	14,0	14,333	125	16,0	13,5	15,5	15,000
126	14,0	13,0	13,5	13,500	126	16,0	12,5	14,5	14,333
127	13,0	13,0	13,0	13,000	127	15,5	14,0	13,5	14,333
128	14,0	13,0	13,5	13,500	128	14,5	14,5	13,5	14,167
129	14,0	14,5	14,0	14,167	129	15,0	13,5	14,5	14,333
130	14,5	13,5	14,5	14,167	130	14,5	14,0	14,5	14,333
131	13,5	14,0	13,5	13,667	131	14,0	14,0	15,0	14,333
132	14,0	13,5	13,5	13,667	132	14,5	14,0	14,5	14,333
133	14,5	12,5	13,5	13,500	133	16,5	13,5	13,5	14,500
134	14,0	13,5	15,0	14,167	134	13,5	15,0	13,0	13,833
135	14,5	14,0	14,0	14,167	135	14,0	15,5	13,5	14,333
136	14,5	15,5	15,0	15,000	136	13,5	1,0	14,0	9,500

137	15,5	14,5	14,5	14,833	137	15,5	14,5	16,5	15,500
138	16,0	14,0	14,5	14,833	138	15,5	14,5	15,5	15,167
139	16,0	14,0	14,5	14,833	139	15,0	14,5	14,0	14,500
140	15,5	15,5	14,5	15,167	140	14,5	14,5	14,5	14,500
141	13,0	14,5	14,5	14,000	141	15,0	13,5	14,5	14,333
142	14,0	14,0	14,0	14,000	142	15,5	14,0	15,0	14,833
143	14,5	14,0	14,5	14,333	143	15,5	14,0	15,0	14,833
144	14,5	14,0	15,0	14,500	144	14,5	13,5	14,0	14,000
145	14,5	14,0	13,5	14,000	145	14,5	14,0	15,0	14,500
146	14,0	13,5	13,5	13,667	146	16,0	13,5	15,0	14,833
147	14,0	13,5	14,5	14,000	147	14,5	14,0	14,5	14,333
148	15,0	14,5	15,5	15,000	148	15,0	15,0	15,0	15,000
149	16,5	15,0	16,0	15,833	149	14,5	15,0	15,0	14,833
150	16,0	14,5	16,0	15,500	150	17,5	13,0	15,5	15,333
151	16,0	13,5	13,0	14,167	151	18,0	13,0	14,0	15,000
152	15,0	12,5	12,0	13,167	152	15,5	12,0	13,0	13,500
153	13,0	12,5	12,0	12,500	153	14,5	13,0	12,0	13,167
154	16,5	11,5	13,0	13,667	154	14,5	11,5	11,5	12,500
155	13,5	11,0	11,0	11,833	155	13,0	10,0	11,0	11,333
156	12,0	9,5	9,5	10,333	156	13,0	9,0	10,0	10,667
157	12,5	9,5	9,5	10,500	157	10,5	9,0	10,0	9,833

Fonte: Autor

## APÊNDICE B - Notas

Os códigos desenvolvidos para as análises da uniformidade nos cenários combinatórios de entupimento, realizadas nesta dissertação, está disponível publicamente no repositório *GitHub* e *Zenodo*, registrado com DOI: 10.5281/zenodo.18495332

<https://doi.org/10.5281/zenodo.18495331>

O notebook principal, contendo a combinação de todos os cenários de entupimento: (VOLUMENEGATIVO\_TENTATIVA\_ANALISE\_SEM\_EVP\_MATHEUS.ipynb).