UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ - UNIOESTE

CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS - CAMPUS CASCAVEL

PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

VARIABILIDADE ESPACIAL DA UNIFORMIDADE DA LÂMINA DE ÁGUA APLICADA POR SISTEMAS FIXOS DE IRRIGAÇÃO POR ASPERSÃO

JORGE TOMOYOSHI TAMAGI

CASCAVEL

2012

JORGE TOMOYOSHI TAMAGI

VARIABILIDADE ESPACIAL DA UNIFORMIDADE DA LÂMINA DE ÁGUA APLICADA POR SISTEMAS FIXOS DE IRRIGAÇÃO POR ASPERSÃO

Tese apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Agrícola em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia Agrícola, área de concentração **Engenharia de Sistemas Agroindustriais**.

Orientador: Prof. Dr. Miguel Angel Uribe Opazo

Co-Orientador: Prof. Dr. Marcio Antonio Vilas Boas

CASCAVEL - PARANÁ - BRASIL

2012

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Biblioteca Central do Campus de Cascavel – Unioeste
Ficha catalográfica elaborada por Jeanine da Silva Barros CRB-9/1362

T154v Tamagi, Jorge Tomoyoshi
Variabilidade espacial da uniformidade da lâmina de água aplicada por sistemas fixos de irrigação por aspersão. / Jorge Tomoyoshi Tamagi. — Cascavel, PR: UNIOESTE, 2012.
108 f. ; 30 cm.

Orientador: Prof. Dr. Miguel Angel Uribe Opazo
Co-orientador: Prof. Dr. Marcio Antonio Vilas Boas
Tese (Doutorado) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná.
Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Engenharia Agrícola, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas.
Bibliografia.

1. Geoestatística. 2. Coeficiente de uniformidade. 3. Mapas temáticos. I. Universidade Estadual do Oeste do Paraná. II. Título.

CDD 21. ed. 631.3

Revisor de Língua Portuguesa, Língua Inglesa e Normas de edição: Prof. Ms. José Carlos da Costa, em 08 de outubro de 2012.

JORGE TOMOYOSHI TAMAGI

"Variabilidade espacial da uniformidade da lâmina de água aplicada por sistemas fixos de irrigação por aspersão"

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação "*Stricto Sensu*" em Engenharia Agrícola em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de doutor em Engenharia Agrícola, área de concentração Engenharia de Sistemas Agroindustriais, **aprovada** pela seguinte banca examinadora:

Orientador: Prof. Dr. Miguel Angel Uribe Opazo
Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, UNIOESTE

Prof. Dr. Giuliani do Prado
Centro de Ciências Agrárias, UEM

Profª. Drª. Rosangela Aparecida Botinha Assumpção
Colegiado de Ciências Biológicas, UTFPR

Prof. Dr. Erivelto Mercante
Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, UNIOESTE

Profª. Drª. Luciana Pagliosa Carvalho Guedes
Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, UNIOESTE

Prof. Dr. Jerry Adriani Johann
Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, UNIOESTE

Cascavel, 06 de julho de 2012.

BIOGRAFIA

Jorge Tomoyoshi Tamagi

Nascimento: 06 de setembro de 1952.

Localidade: Maringá - Paraná.

Ensino Fundamental: Colégio Estadual Gastão Vidigal - Maringá - PR.

Ensino Médio: Colégio Comercial Estadual de Maringá - Maringá - PR.

Ensino Superior: Universidade Estadual de Maringá - Maringá - PR.

Curso Graduação: Engenharia Química - 1980.

Mestrado: Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Cascavel - PR.

Mestrado: Engenharia Agrícola - 2004.

Professor CLT: Colégio Paraná - Maringá - PR.

- Ensino Médio e Diretor Adjunto - 1976/1981.

Professor CLT: Curso e Colégio Canadá - Londrina - PR.

- Ensino Médio - 1983/1984.

Professor CLT: Sociedade Educacional Oeste do Paraná Ltda. - Colégio Rio Branco/Colégio Canadá - Cascavel - PR.

- Ensino Médio, Cursinho e Coordenação - 1985/1986.

Professor e Proprietário Curso Cobra Vestibulares - Cascavel - PR.

Cursinho Pré-Vestibular: Direção e aulas de Química - 1986/2000.

Professor Assistente: União Pan-Americana de Ensino - Unipan - Cascavel - PR.

- Graduação em Engenharia de Produção e Engenharia Ambiental - 2008/2011.

Gerente de Negócios - White Martins Gases Industriais Ltda. - Cascavel - PR.

- Técnico de Serviços Gases/Engenheiro/Gerente - 09/1986 - atual.

“Não estrague o que você tem pensando naquilo que não tem.
Mas lembre-se que as coisas que você tem agora
eram antes aquelas que você anseava.”
Epicuro (filósofo grego)

“Por que olhares o cisco que está
no olho do teu irmão, se a trave que está
no teu olho, não a reparas?”
Lucas 6:41

À DEUS que é o Senhor da minha vida.

À minha esposa, filhos e genro
Dina, Wesley, Patrícia, Willian e Nestor.

Aos meus irmãos, cunhadas e sobrinhos
Leopoldo (em memória), Milton e Carmo
Antonia, Cleusa e Eva
Jalder, Juliana, Norton, Marcos, Daniela, Yuri, Gabriel e Yasmin.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

A DEUS, nosso Pai, pois “Aquele que habita no esconderijo do Altíssimo, à sombra do Onipotente descansará” (Sl 91.1);

À minha esposa, filhos e genro pelo amor, carinho, respeito, apoio, muita paciência, palavras de motivação, colaboração na implantação do projeto e coleta de dados no campo experimental onde foi implantado o experimento;

Aos meus irmãos, cunhadas e sobrinhos que sempre acreditaram que eu conseguiria terminar mais este desafio;

Aos meus amados pais e minha sogra (em memória), por tudo que me ensinaram nesta vida e deram exemplos, carinho e amor, pois nesta vida de transição o importante é “o amar”;

Ao Professor Dr. Miguel Angel Uribe Opazo, pela amizade e orientação na pesquisa, apoio irrestrito e companheiro em todos os momentos desta caminhada científica e na elaboração da tese;

Ao Professor Dr. Marcio Antonio Vilas Boas, pela amizade, apoio moral e espiritual em todos os momentos difíceis desta jornada científica, desde a implantação do projeto para coleta de dados até a elaboração desta tese;

Aos amigos: Jeferson Leandro Penga, da Floricultura & Mercado de Plantas Cascavel, pela amizade e por ter disponibilizado o local do experimento e Lazaro Aparecido Silveira, da Hidrobombas Cascavel, por ter cedido a bomba de água necessária ao estudo;

A Estanis Opazo por ter sido solidária, me ajudando quando tive um problema de saúde, ter orado e acreditado sempre que eu seria capaz de concluir esta caminhada;

Aos meus amigos Eron, Marlene, Florian e Hamilton Schirmer, Alba Krishna Feldman, Alexandre Dall’onder, Deonir Trentim, Gustavo Dalposso, Marco Mathias, pelo apoio durante esta jornada e na implantação do experimento;

A todos os professores e funcionários que se empenham no crescimento educacional dos alunos e do curso;

Ao PGEAGRI da Universidade Estadual do Oeste do Paraná - UNIOESTE pela oportunidade disponiblizada a mim e a todos aqueles que desejam crescer na busca do conhecimento científico;

A White Martins, na pessoa do meu gerente Ricardo dos Santos Guimarães que sempre me apoiou com a sua compreensão e amizade e meus amigos de Cia. Floriani, Otavio, Daniel, Sandro, Eduardo, Mirna e tantos outros que sempre estiveram torcendo para um final feliz.

VARIABILIDADE ESPACIAL DA UNIFORMIDADE DA LÂMINA DE ÁGUA APLICADA POR SISTEMAS FIXOS DE IRRIGAÇÃO POR ASPERSÃO

RESUMO

A uniformidade de aplicação de água é um importante fator a ser considerado na avaliação dos sistemas de irrigação por aspersão. A uniformidade depende do tipo de aspersor e suas condições operacionais: a disposição e o espaçamento entre os aspersores no campo, a velocidade e a direção do vento durante o período de aplicação de água. Este trabalho contribui para desenvolver técnicas adequadas de avaliação de resultados para a melhoria do sistema. O experimento foi conduzido na chácara denominada Floricultura & Mercado de Plantas Cascavel, região norte da cidade de Cascavel-PR, a 24º 55' 04" Sul e 53º 28' 31" Oeste. Foram instalados uma caixa de água de 5 m^3, uma bomba, válvulas e hidrômetro. Foram utilizadas duas parcelas S1 e S2 de 10 x 10 m; na S1 foram instalado manômetros, 100 coletores, 4 aspersores super 10 bocal azul, compensantes e, após 32 ensaios, foram substituidos por 4 aspersores super 10 bocal azul, não compensantes a 1,5 m de altura; o mesmo foi aplicado na parcela S2, onde somente a altura dos aspersores mudou para 1,0 m de altura. Durante a irrigação por aspersão, a cada 1 hora, foi coletada e quantificada a quantidade de água nos coletores por meio de uma proveta graduada; foram anotados as condições de vento, temperatura e umidade do ar no início e em intervalos de 10 minutos, por meio de uma estação metereológica portátil *La Crosse Technology*. Este estudo teve como propósito verificar, por meio de modelos geoestatísticos, se os dados coletados das lâminas de água e uniformidade de irrigação por aspersão possuem estruturas de dependência espacial. Os resultados obtidos confirmaram que existe variabilidade espacial para as lâminas médias de água na irrigação por aspersão com aspersores compensantes a 1,0 m de altura e para as lâminas médias de água na irrigação por aspersão com aspersores não compensantes a 1,5 m de altura. Verificou-se também a existência de variabilidade espacial para o Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC), Coeficiente de Uniformidade de Distribuição (CUD) e Coeficiente de Uniformidade Estatístico (CUE). Nos mapas temáticos, construídos para o Coeficiente de Uniformidade de Christiansen, Coeficiente de Uniformidade de Distribuição e Coeficiente de Uniformidade Estatístico com aspersores compensantes a 1,0 m de altura, observou-se uma melhor uniformidade da irrigação por aspersão. Verificou-se que a velocidade do vento afeta de forma inversamente proporcional o Coeficiente de Uniformidade de Christiansen.

Palavras-chave: Geoestatística; Coeficiente de uniformidade; Mapas temáticos.

SPATIAL VARIABILITY OF WATER LEVEL UNIFORMITY APPLIED BY FIXED SPRINKLER IRRIGATION SYSTEMS

ABSTRACT

Water application uniformity is an important factor to be considered in the evaluation of sprinkler irrigation systems. The uniformity depends on the type of sprinkler and its operational conditions, the display and space among the sprinklers on the field, and also the wind speed and direction during the water applying period. This work contributes to develop appropriate techniques for results evaluation in order to improve the system. The experiment was conducted at a farm called “Floricultura & Mercado de Plantas Cascavel”, north region of the city of Cascavel, Paraná, at 24º 55’ 04” South latitude and 53º 28’ 31” West longitude. Two water tanks of 5m³, a bomb, valves and hydrometer were installed. Two land areas were used, S1 and S2 of 10 x 10 m. On S1 were installed manometers, 100 collectors or pluviometers, 4 Super 10 blue nozzle pressure compensating sprinklers which, after 32 trials, were replaced by 4 Super 10 blue nozzle non pressure compensating sprinklers at 1.5m height, and the same on the area S2, in which the sprinklers were set at 1m height. During the sprinkler irrigation, at every 1h interval the amount of water in the collectors or pluviometers were collected and quantified by a graduated cylinder, and during this hour the wind condition, temperature and air humidity at the beginning from 10 to 10 minutes were recorded by a portable meteorological La Crosse Technology station. This study aimed to analyze by geostatistical methods if all data collected from water levels and irrigation uniformity by sprinkler irrigation have structures of spatial dependence. Results show that there is spatial variability for the average water depths in irrigation by aspersion with compensating sprinklers at 1.0 m height and average water depths in sprinkler irrigation with non-compensating sprinklers at 1.5m height. The existence of the special variability for the Christiansen uniformity coefficient (CUC), coefficient of uniformity of distribution (CUD) and statistical uniformity coefficient (CUE) was also verified. The best irrigation by aspersion was observed in the thematic maps produced for the Christiansen uniformity, coefficient of distribution and statistical uniformity coefficient with compensating sprinklers at 1,0 m high. It was observed that the wind speed affects the Christiansen coefficient of uniformity in an inverse ratio.

Keywords: Geostatistics; Uniformity coefficient; Thematic maps.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS ..... **xi**

LISTA DE FIGURAS ..... **xiii**

1 INTRODUÇÃO **1**

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA **3**

2.1 A água e recursos hídricos 3

2.2 Métodos de irrigação 4

2.2.1 Irrigação por aspersão 6

2.3 O coeficiente de uniformidade 8

2.4 Controle de processo 11

2.4.1 Cartas de controle para variáveis 12

2.4.1.1 Cartas de controle $\overline{X}$ e *S* (Média e desvio padrão) 12

2.4.1.2 Carta *X* individual e *AM* 13

2.4.2 Capacidade de processos 14

2.4.2.1 Índices de capacidade do processo 14

2.4.2.2 Potencial do processo ou capacidade do processo (C_p) 14

2.4.2.3 Índice de desempenho de processo (C_{pk}) 16

2.4.2.4 Índice de capacidade para situações em que há apenas um limite de especificação 16

2.5 Geoestatística 17

2.5.1 Modelo espacial linear 18

2.5.2 Semivariograma 20

2.5.3 Anisotropia 22

2.5.4 Modelos teóricos espaciais 22

2.5.5 Método de estimação de parâmetros 25

2.5.6 Critérios de seleção de modelos 27

2.5.6.1 Validação cruzada 27

2.5.7 Krigagem 28

3 MATERIAL E MÉTODOS **30**

3.1 O local da pesquisa 30

3.2 Parcelas S1 e S2 30

3.3 Grade amostral e disposição dos coletores ou pluviômetros 32

3.4 Análise dos dados 34

3.5 *Software* utilizado 34

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO 35
4.1 Análise das variáveis agrometereológicas 35
4.2 Análise das variáveis das lâminas médias de água de irrigação por aspersão dos 100 coletores nos 32 ensaios 37
4.2.1 Cartas de controle das lâminas médias de água de irrigação por aspersão dos 100 coletores nos 32 ensaios realizados 38
4.2.2 Análise espacial das lâminas médias de água de irrigação por aspersão dos 100 coletores, com uso de aspersores compensantes e não compensantes a 1,0 e 1,5 m de altura 40
4.2.2.1 Mapas temáticos das lâminas médias de água de irrigação por aspersão dos 100 coletores com aspersores compensantes e não compensantes a 1,0 e 1,5 m de altura 46
4.3 Análise estatística das variáveis CUC, CUD e CUE das lâminas médias de água de irrigação por aspersão dos 100 coletores 49
4.3.1 Cartas de controle das variáveis CUC, CUD e CUE das lâminas médias de água de irrigação por aspersão dos 100 coletores 51
4.3.2 Ánalise espacial das variáveis CUC, CUD e CUE da lâmina de água de irrigação por aspersão dos 100 coletores com os aspersores compensantes e não compensantes a 1,0 m e 1,5 m de altura 55
4.3.3 Mapas temáticos dos CUC, CUD e CUE das lâminas médias de água de irrigação por aspersão dos 100 coletores 70
4.4 Análise estatística das variáveis CUC, CUD e CUE das lâminas de água de irrigação por aspersão, dos 32 ensaios com aspersores compensantes e não compensantes a 1,0 e 1,5 m de altura 77
4.4.1 Cartas de controle X Individual e AM (amplitude móvel) para o CUC, CUD e CUE da irrigação por aspersão, dos 32 ensaios com aspersores compensantes e não compensantes a 1,0 e 1,5 m de altura 83
4.4.2 Valores dos índices de capacidade o processo C_p e C_{pk} 88
5 CONCLUSÕES 91
REFERÊNCIAS 92
ANEXO 98
ANEXO A FATORES PARA CONSTRUÇÃO DE GRÁFICOS DE CONTROLE PARA VARIÁVEIS ..... Erro! Indicador não definido.
APÊNDICE 100
APÊNDICE A ESTATÍTICA DESCRITIVA DOS DADOS DOS COLETORES 101

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Análise exploratória das variáveis: velocidade do vento (V), temperatura (T) e umidade do ar (UM), para os aspersores compensantes a 1,0 m de altura 35

Tabela 2 Análise exploratória das variáveis: velocidade do vento (V), temperatura (T) e umidade do ar (UM), para os aspersores compensantes a 1,5 m de altura 36

Tabela 3 Análise exploratória das variáveis: velocidade do vento (V), temperatura (T) e umidade do ar (UM), para os aspersores não compensantes a 1,0 m de altura36

Tabela 4 Análise exploratória das variáveis: velocidade do vento (V), temperatura (T) e umidade do ar (UM), para os aspersores não compensantes a 1,5 m de altura37

Tabela 5 Análise exploratória das variáveis: lâmina de água de irrigação média por aspersão dos aspersores compensantes e não compensantes a 1,0 e 1,5 m de altura 38

Tabela 6 Parâmetros e modelos de semivariogramas ajustados, para as variáveis lâminas de água de irrigação por aspersão, com aspersores compensantes e não compensantes a 1,0 e 1,5 m de altura. 41

Tabela 7 Resumo das análises das variáveis: CUC, CUD e CUE das lâminas médias de água de irrigação por aspersão, dos 100 coletores ou pluviômetros compensantes a 1,0 e 1,5 m de altura..... 50

Tabela 8 Resumo das análises das variáveis independentes: CUC, CUD e CUE das lâminas médias de água de irrigação por aspersão, dos 100 coletores não compensantes a 1,0 e 1,5 m de altura..... 51

Tabela 9 Parâmetros e modelos dos semivariogramas escalonados, para as variáveis, CUC, CUD e CUE da lâmina de água de irrigação por aspersão, dos 100 coletores com aspersores compensantes e não compensantes a 1,0 e 1,5 m de altura 56

Tabela 10 Análise exploratória das variáveis CUC, CUD, CUE da lâmina de água de irrigação, dos 32 ensaios com aspersores compensantes a 1,0 e 1,5 m de altura 79

Tabela 11 Análise exploratória das variáveis CUC, CUD, CUE da lâmina de água de irrigação por aspersão, dos 32 ensaios com aspersores não compensantes a 1,0 e 1,5 m de altura..... 79

Tabela 12 Valores do Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC), Coeficiente de Uniformidade de Distribuição (CUD) e Coeficiente Estatístico de Uniformidade

(CUE), obtidos nos 32 ensaios com aspersores compensantes a 1,0 m de altura 80

Tabela 13 Valores do Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC), Coeficiente de Uniformidade de Distribuição (CUD) e Coeficiente Estatístico de Uniformidade (CUE), obtidos nos 32 ensaios com aspersores compensantes a 1,5 m de altura 81

Tabela 14 Valores do Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC), Coeficiente de Uniformidade de Distribuição (CUD) e Coeficiente Estatístico de Uniformidade (CUE), obtidos nos 32 ensaios com aspersores não compensantes a 1,0 m de altura 82

Tabela 15 Valores do Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC), Coeficiente de Uniformidade de Distribuição (CUD) e Coeficiente Estatístico de Uniformidade (CUE), obtidos nos ensaios com aspersores não compensantes a 1,5 m de altura 83

Tabela 16 Valores calculados de índices de capacidade de processo (C_p) e índices de desempenho de processo (C_{pk}), para os 32 ensaios dos aspersores compensantes e não compensantes a 1,0 e 1,5 m de altura 89

Tabela 17 Modelos de regressão linear dos coeficientes de uniformidade CUC, com aspersores compensantes e não compensantes a 1,0 e 1,5 m de altura, em função da velocidade do vento (CUC = $\hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 v$) 89

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Relação entre a função de covariância espacial *C*(*h*) e a semivariância *γ*(*h*). . 21

Figura 2 Convenções direcionais usadas na geoestatística. 22

Figura 3 Localização da área experimental. 30

Figura 4 Layout da área e equipamentos que foram utilizados. 31

Figura 5 Layout da distribuição dos coletores e aspersores utilizados no experimento. 32

Figura 6 Carta de controle da média e desvio padrão (S), para as lâminas de água de irrigação por aspersão dos 100 coletores, com aspersores compensantes a 1,0 m de altura. 39

Figura 7 Carta de controle da média e desvio padrão (S), para lâminas de água de irrigação por aspersão dos 100 coletores, com aspersores compensantes a 1,5 m de altura. 39

Figura 8 Carta de controle da média e desvio padrão (S), para as lâminas de água de irrigação por aspersão dos 100 coletores, com aspersores não compensantes a 1,0 m de altura. 40

Figura 9 Carta de controle da média e desvio padrão (S), para as lâminas de água de irrigação por aspersão dos 100 coletores, com aspersores não compensantes a 1,5m de altura. 40

Figura 10 Semivariograma experimental e modelo ajustado da LMC1,0 m pelo modelo gaussiano. 42

Figura 11 Envelope da semivariância da LMC1,0 m. 43

Figura 12 Semivariograma experimental e modelo ajustado da LMC1,5 m pelo modelo gaussiano. 43

Figura 13 Envelope da semivariância da LMC1,5 m. 44

Figura 14 Semivariograma experimental e modelo ajustado da LMNC1,0 m pelo modelo gaussiano. 44

Figura 15 Envelope das semivariâncias da LMNC1,0 m. 45

Figura 16 Semivariograma experimental e modelo ajustado da LMNC1,5 m pelo modelo gaussiano. 45

Figura 17 Envelope das semivariâncias da LMNC1,5 m. 46

Figura 18 Mapa temático da lâmina média de água de irrigação por aspersão, com aspersores compensantes a 1,0 m de altura (LMC1,0 m). 47

Figura 19 Mapa temático da lâmina média de água de irrigação por aspersão, com aspersores não compensantes a 1,0 m de altura (LMNC1,0 m). 48
Figura 20 Mapa temático da lâmina média de água de irrigação por aspersão, com aspersores compensantes a 1,5 m de altura (LMC1,5 m). 48
Figura 21 Mapa temático da lâmina média de água de irrigação por aspersão, com aspersores não compensantes a 1,5 m de altura (LMNC1,5 m). 49
Figura 22 Carta de controle da média individual e AM (amplitude móvel), para o CUC dos 100 coletores, com aspersores compensantes a 1,0 m de altura (CUCC1,0 m).51
Figura 23 Carta de controle da média individual e AM (amplitude móvel), para o CUD dos 100 coletores, com aspersores compensantes a 1,0 m de altura (CUDC1,0 m),52
Figura 24 Carta de controle da média individual e AM (amplitude móvel), para o CUE dos 100 coletores, com aspersores compensantes a 1,0 m de altura (CUEC1,0 m).52
Figura 25 Carta de controle da média individual e AM (amplitude móvel), para o CUC dos 100 coletores, com aspersores compensantes a 1,5 m de altura (CUCC1,5 m).52
Figura 26 Carta de controle da média individual e AM (amplitude móvel), para o CUD dos 100 coletores, com aspersores compensantes a 1,5 m de altura (CUDC1,5 m).53
Figura 27 Carta de controle da média individual e AM (amplitude móvel), para o CUE dos 100 coletores, com aspersores compensantes a 1,5 m de altura (CUEC1,5 m).53
Figura 28 Carta de controle da média individual e AM (amplitude móvel), para o CUC dos 100 coletores, com aspersores não compensantes a 1,0 m de altura (CUCNC1,0 m). 53
Figura 29 Carta de controle da média individual e AM (amplitude móvel), para o CUD dos 100 coletores, com aspersores não compensantes a 1,0 m de altura (CUDNC1,0 m). 54
Figura 30 Carta de controle da média individual e AM (amplitude móvel), para o CUE dos 100 coletores, com aspersores não compensantes a 1,0 m de altura (CUENC1,0 m). 54
Figura 31 Carta de controle da média individual e AM (amplitude móvel), para o CUC dos 100 coletores, com aspersores não compensantes a 1,5 m de altura (CUCNC1,5 m). 54
Figura 32 Carta de controle da média individual e AM (amplitude móvel), para o CUD dos 100 coletores, com aspersores não compensantes a 1,5 m de altura (CUDNC1,5 m). 55
Figura 33 Carta de controle da média individual e AM (amplitude móvel), para o CUE dos 100 coletores, com aspersores não compensantes a 1,5 m de altura (CUENC1,5 m). 55

Figura 34 Semivariograma experimental e modelo ajustado do CUC, com aspersores compensantes a 1,0 m de altura (CUCC1,0 m), pelo modelo gaussiano. 57
Figura 35 Envelope das semivariâncias CUCC1,0 m. 58
Figura 36 Semivariograma experimental e modelo ajustado do CUD, com aspersores compensantes a 1,0 m de altura (CUDC1,0 m), pelo modelo gaussiano. 58
Figura 37 Envelope das semivariâncias do CUDC1,0 m. 59
Figura 38 Semivariograma experimental e modelo ajustado do CUE, com aspersores compensantes a 1,0 m de altura (CUEC1,0 m), pelo modelo gaussiano. 59
Figura 39 Envelope das semivariâncias do CUEC1,0 m..... 60
Figura 40 Semivariograma experimental e modelo ajustado do CUC, com aspersores compensantes a 1,5 m de altura (CUCC1,5 m), pelo modelo esférico..... 61
Figura 41 Envelope das semivariâncias do CUCC1,5 m. 61
Figura 42 Semivariograma experimental e modelo ajustado do CUD, com aspersores compensantes a 1,5 m de altura (CUDC1,5 m), pelo modelo gaussiano. 62
Figura 43 Envelope das semivariâncias do CUDC1,5 m. 62
Figura 44 Semivariograma experimental e modelo ajustado do CUE, com aspersores compensantes a 1,5 m de altura (CUEC1,5 m), pelo modelo esférico. 63
Figura 45 Envelope das semivariâncias do CUDC1,5 m. 63
Figura 46 Semivariograma experimental e modelo ajustado do CUC, com aspersores não compensantes a 1,0 m de altura (CUCNC1,0 m), pelo modelo esférico. 64
Figura 47 Envelope das semivariâncias do CUCNC1,0 m..... 65
Figura 48 Semivariograma experimental e modelo ajustado do CUD, com aspersores não compensantes a 1,0 m de altura (CUDNC1,0 m), pelo modelo gaussiano. 65
Figura 49 Envelope das semivariâncias do CUDNC1,0 m..... 66
Figura 50 Semivariograma experimental e modelo ajustado do CUE, com aspersores não compensantes a 1,0 m de altura (CUENC1,0 m), pelo modelo gaussiano..... 66
Figura 51 Envelope das semivariâncias do CUENC1,0 m. 67
Figura 52 Semivariograma experimental e modelo ajustado do CUC, com aspersores não compensantes a 1,5 m de altura (CUCNC1,5 m), pelo modelo esférico. 67
Figura 53 Envelope das semivariâncias do CUCNC1,5 m..... 68
Figura 54 Semivariograma experimental e modelo ajustado do CUD, com aspersores não compensantes a 1,5 m de altura (CUDNC1,5 m), pelo modelo Matérn..... 68
Figura 55 Envelope das semivariâncias do CUDNC1,5 m..... 69
Figura 56 Semivariograma experimental e modelo ajustado do CUE, com aspersores não compensantes a 1,5 m de altura (CUENC1,5 m), pelo modelo gaussiano..... 69
Figura 57 Envelope das semivariâncias do CUENC1,5 m. 70

Figura 58 Mapa temático do CUC das lâminas médias de água de irrigação por aspersão, dos 100 coletores com aspersores compensantes a 1,0 m de altura (CUCC1,0 m) 71
Figura 59 Mapa temático do CUD das lâminas médias de água, dos 100 coletores com aspersores compensantes a 1,0 m de altura (CUDC1,0 m)..... 71
Figura 60 Mapa temático do CUE das lâminas médias de água de irrigação por aspersão, dos 100 coletores com aspersores compensantes a 1,0 m de altura (CUEC1,0 m)..... 72
Figura 61 Mapa temático do CUC das lâminas médias de água de irrigação por aspersão, dos 100 coletores com aspersores compensantes a 1,5 m de altura (CUCC1,5 m)..... 72
Figura 62 Mapa temático do CUD das lâminas médias de água de irrigação por aspersão, dos 100 coletores com aspersores compensantes a 1,5 m de altura (CUDC1,5 m)..... 73
Figura 63 Mapa temático do CUE das lâminas médias de água de irrigação por aspersão, dos 100 coletores com aspersores compensantes a 1,5 m de altura (CUEC1,5 m)..... 73
Figura 64 Mapa temático do CUC das lâminas médias de água de irrigação por aspersão, dos 100 coletores com aspersores não compensantes a 1,0 m de altura (CUCNC1,0 m). 74
Figura 65 Mapa temático do CUD das lâminas médias de água de irrigação por aspersão, dos 100 coletores com aspersores não compensantes a 1,0 m de altura (CUDNC1,0 m). 74
Figura 66 Mapa temático do CUE das lâminas médias de água de irrigação por aspersão, dos 100 coletores com aspersores não compensantes a 1,0 m de altura (CUENC1,0 m). 75
Figura 67 Mapa temático do CUC das lâminas médias de água de irrigação por aspersão, dos 100 coletores com aspersores não compensantes a 1,5 m de altura (CUCNC1,5 m). 75
Figura 68 Mapa temático do CUD das lâminas médias de água de irrigação por aspersão, dos 100 coletores com aspersores compensantes a 1,5 m de altura (CUDNC1,5 m). 76
Figura 69 Mapa temático do CUE das lâminas médias de água de irrigação por aspersão, dos 100 coletores com aspersores não compensantes a 1,5 m de altura (CUENC1,5 m). 76

Figura 70 Carta de controle da média individual e AM (amplitude móvel), para o CUC da irrigação por aspersão dos 32 ensaios, com aspersores compensantes a 1,0 m de altura (CUC-C1,0 m)..... 84
Figura 71 Carta de controle da média individual e AM (amplitude móvel), para o CUD da irrigação por aspersão dos 32 ensaios, com aspersores compensantes a 1,0 m de altura (CUD-C1,0 m)..... 84
Figura 72 Carta de controle da média individual e AM (amplitude móvel), para o CUE da irrigação por aspersão dos 32 ensaios, com aspersores compensantes a 1,0 m de altura (CUE-C1,0 m),..... 85
Figura 73 Carta de controle da média individual e AM (amplitude móvel), para o CUC da irrigação por aspersão dos 32 ensaios, com aspersores compensantes a 1,5 m de altura (CUC-C1,5 m)..... 85
Figura 74 Carta de controle da média individual e AM (amplitude móvel), para o CUD da irrigação por aspersão dos 32 ensaios, com aspersores compensantes a 1,5 m de altura (CUD-C1,5 m)..... 85
Figura 75 Carta de controle da média individual e AM (amplitude móvel), para o CUE da irrigação por aspersão dos 32 ensaios, com aspersores compensantes a 1,5 m de altura (CUE-C1,5 m)..... 86
Figura 76 Carta de controle da média individual e AM (amplitude móvel), para o CUC da irrigação por aspersão dos 32 ensaios, com aspersores não compensantes a 1,0 m de altura (CUC-NC1,0 m). 86
Figura 77 Carta de controle da média individual e AM (amplitude móvel), para o CUD da irrigação por aspersão dos 32 ensaios, com aspersores não compensantes a 1,0 m de altura (CUD-NC1,0 m). 86
Figura 78 Carta de controle da média individual e AM (amplitude móvel), para o CUE da irrigação por aspersão dos 32 ensaios, com aspersores não compensantes a 1,0 m de altura (CUE-NC1,0 m)..... 87
Figura 79 Carta de controle da média individual e AM (amplitude móvel), para o CUC da irrigação dos 32 ensaios, com aspersores não compensantes a 1,5 m de altura (CUC-NC1,5 m)..... 87
Figura 80 Carta de controle da média individual e AM (amplitude móvel), para o CUD da irrigação dos 32 ensaios, com aspersores não compensantes a 1,5 m de altura (CUD-NC1,5 m)..... 87
Figura 81 Carta de controle da média individual e AM (amplitude móvel), para o CUE da irrigação dos 32 ensaios, com aspersores não compensantes a 1,5 m de altura (CUE-NC1,5 m)..... 88

Figura 82 Modelo de regressão linear do CUC-NC1,0 m, em função da velocidade do vento (V)..... 90

1 INTRODUÇÃO

O Brasil é um país que possui as maiores reservas de água doce do planeta (12% do total mundial) que, aliada à sua biodiversidade e à beleza e abundância dos seus rios e lagos, representa um incalculável patrimônio natural. Todavia, os problemas relacionados à distribuição espacial e temporal da água representam enormes desafios para milhares de pessoas da população brasileira que, de acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - (IBGE, 2010), é de 190.755.799 habitantes.

A água é um mineral presente em toda a natureza, sendo vital para a vida. É um recurso natural peculiar, pois se renova pelos processos físicos do ciclo hidrológico, em que a Terra se comporta como um gigantesco destilador, pela ação do calor do Sol e das forças da gravidade. É, ainda, parte integrante dos seres humanos, pois corresponde de 60 a 70% do nosso peso corporal, regula a nossa temperatura interna e é essencial para todas as funções orgânicas.

Os recursos hídricos têm profunda importância no desenvolvimento de diversas atividades econômicas. Em relação à produção agrícola, a água pode representar até 90% da composição física das plantas. A sua falta em períodos de crescimento dos vegetais pode destruir lavouras e até ecossistemas devidamente implantados. Na indústria, para se obter diversos produtos, as quantidades de água necessárias são muitas vezes superiores ao volume produzido (BARTH; BARBOSA, 1999; COSTA, 1994).

A irrigação é uma técnica milenar que tem por objetivo fornecer a quantidade necessária de água à planta no momento em que ela necessita e na quantidade exata. A tecnologia de irrigação, desde que adequadamente desenvolvida, traz inúmeros benefícios como aumento da produtividade de alimentos e geração de empregos, com consequente crescimento da rentabilidade dos produtos rurais (FAGANELLO *et al*., 2007).

Existem três métodos de irrigação. Por superfície (sulcos e inundação) considerados de baixa eficiência e demandam grandes volumes de água. A irrigação por aspersão (convencional, auto-propelido e pivô central) sobrecopa e subcopa, que proporciona 100% de molhamento da área cultivada, não impondo nenhuma limitação ao pleno desenvolvimento das raízes e localizada (gotejamento). Na aspersão não se deve esperar elevados coeficientes de uniformidade de distribuição de água e deve-se tomar cuidado nos períodos de floração, quando o impacto d'água dos aspersores pode provocar queda das flores.

Segundo Brennan, Narasimha e Holtham (2007), a uniformidade de distribuição é a principal maneira usada para determinar se um sistema de irrigação é aceitável ou não.

Dentre os coeficientes de uniformidade, o mais utilizado é o Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC).

Dentre as principais variáveis hidrológicas analisadas, a precipitação é de grande importância, principalmente, nas regiões de escassez hídricas, tais como o nordeste brasileiro. A precipitação é um fenômeno caracterizado por alta variabilidade espacial e temporal, traduzindo vulnerabilidade dos ecossistemas da região (MONTENEGRO; BEZERRA; LIMA, 2004).

Ferreira Filho, Nogueira e Bemfeito (2000), Rodrigues e Silans (2001) têm desenvolvido trabalhos relativos à variação e distribuição espacial da precipitação em áreas do Nordeste brasileiro.

A Geoestatística é um método de análise espacial de variáveis regionalizadas, a qual utiliza o modelo probabilístico associado à localização espaço-temporal dos elementos amostrados, possibilitando, desta forma, uma análise da variabilidade espaço-temporal entre os valores reais observados. Ela tem sido amplamente aplicada e estudada na hidrologia espacial (RODRIGUES; SILANS, 2001).

Os trabalhos com geoestatística têm geralmente se concentrado nas análises espaciais, entretanto a análise espaço-temporal conjunta tem sido pouco estudada. A maioria dos processos de interesse tem variabilidade tanto no tempo como no espaço.

A necessidade de informações hidrológicas e meteorológicas para um efetivo planejamento de recursos hídricos e para o desenvolvimento de diversas atividades tem buscado a ampliação de diversas técnicas e estudos no Brasil e no mundo. A importância da obtenção de informações precisas de variáveis para o desenvolvimento de pesquisas hidrológicas e de agricultura de precisão merece ser destacada, além do reconhecimento da geoestatística como método de estimação com obtenção de resultados mais precisos, quando comparados aos métodos convencionais utilizados.

O objetivo deste estudo é avaliar a variabilidade espacial da uniformidade da lâmina de água aplicada pela irrigação por aspersão, com aspersores super 10, compensantes e não compensantes, bocal azul, NaanDan, a 1,0 m e 1,5 m de altura, utilizando métodos geoestatísticos, cartas de controle de processo e regressão linear.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 A água e recursos hídricos

Água é fonte da vida. Não importa quem somos o que fazemos ou onde vivemos, nós dependemos dela para viver. No entanto, por maior que seja a importância da água, as pessoas continuam poluindo os rios e suas nascentes, esquecendo o quanto ela é essencial para nossas vidas.

Existe água no estado gasoso na atmosfera, proveniente da evaporação de todas as superfícies úmidas - mares, rios e lagos; em estado líquido, nos grandes depósitos do planeta - oceanos e mares (água salgada), rios e lagos (água doce) e no subsolo, constituindo os chamados lençóis freáticos; e em estado sólido, nas regiões frias do planeta.

Da atmosfera, a água se precipita em estado líquido, como chuva, orvalho ou nevoeiro; em estado sólido, como neve ou granizo.

Todas estas formas de água são intercambiáveis e representam o ciclo hidrológico. Este ciclo é um gigantesco sistema natural de purificação da água, que a recicla e purifica constantemente; um processo pelo qual a água que está na atmosfera, na forma de vapor, condensa e volta à terra na forma de precipitação. Uma vez na terra, a água novamente evapora e, assim, sucessivamente (TUNDISI, 2003).

Água é vida, contudo também pode carregar organismos e compostos químicos provenientes da poluição, danosos ao organismo. Assim, não se deve tomar água diretamente de rios ou córregos. Em locais fora do ambiente familiar, deve-se preferir a água mineral, pois os bebedouros públicos podem não estar sendo limpos coma frequências necessária.

O planeta terra é coberto por 75% de água, mas apenas 3% deste total é de água doce. Desta pequena parte, cerca da metade é encontrada na superfície em rios, lagos, represas e geleiras. Infelizmente, a ação do homem está degradando os recursos hídricos, como é o caso dos rios Tietê e Pinheiros, em São Paulo, tornando a água, que é vital para nossa sobrevivência, imprópria para o consumo.

em relação à quantidade de água, o Brasil é um país privilegiado, pois tem a maior reserva de água doce da Terra, 12% do total mundial. Sua distribuição, porém, não é uniforme em todo o território nacional. A Amazônia, por exemplo, é uma região que detém a maior bacia fluvial do mundo. O volume do rio Amazonas é o maior do planeta, sendo

considerado um rio essencial para o planeta. Ao mesmo tempo, é também uma das regiões menos habitada do Brasil.

Em contrapartida, as maiores concentrações populacionais do país encontram-se nas capitais, distantes dos grandes rios brasileiros, como o Amazonas, o São Francisco e o Paraná. O maior problema de escassez ainda é o do nordeste, onde a falta d'água por longos períodos tem contribuido para o abandono das terras e para a migração de sua população para centros urbanos, como São Paulo e Rio de Janeiro, agravando ainda mais o problema da escassez de água nestas cidades.

Além disso, os rios e lagos brasileiros vêm sendo comprometidos pela queda de qualidade da água disponível para captação e tratamento. Na região amazônica, o rio Madeira, no pantanal matogrossense, por exemplo, rios como, o Cuiabá e o Paraguai, já apresentam contaminação pelo mercúrio, metal utilizado no garimpo clandestino, e pelo uso de agrotóxicos nos campos de lavoura. Nas grandes cidades, o comprometimento da qualidade é causado por despejos de esgotos domésticos e industriais, além do uso dos rios como convenientes transportadores de lixo.

A água é de extrema importância para a sobrevivência de qualquer ser vivo, por esta razão é necessário utilizá-la de forma racional. A sustentabilidade deverá superar a escassez e promover uma nova ética para o uso dos recursos hídricos, tendo como base a otimização da utilização, controle dos desperdícios, além de promover o desenvolvimento (TUNDISI, 2005).

2.2 Métodos de irrigação

O Egito está situado às margens do rio Nilo. No ano 4.000 A.C., foram construídos reservatórios para armazenar água nos períodos de cheia na região. Com isso, a água era utilizada, solucionando os problemas de cheia e secas. Iniciava-se o sistema de irrigação no planeta. No ano 300 A. C., o sistema de irrigação foi intensamente expandido em Menphis (sul do Cairo) pelo rei Menes, da primeira dinastia (FUKUDA, 1976). No ano de 700 D. C., 750 mil ha eram irrigados anualmente, passando para 1,5 milhões de ha em 1200 D. C. (HAGAN; RAISER; EDMINSTER, 1967). Acredita-se que os famosos jardins da Babilônia foram os primeiros do mundo a serem irrigados por aspersão.

A principal diferença entre os canais construídos pelos babilônios, em relação aos egípcios é que os babilônios utilizaram tijolos de argila, enquanto os egípcios utilizavam pedras (FUKUDA; FUKUDA; SOUZA, 1981).

Em 2000 A.C., um sistema de irrigação foi desenvolvido na região norte do vale do rio Indus, na área de Punjab. A Índia contribuiu muito com os estudos de hidráulica de canais e sistemas de irrigação através de sua experiência. Em 1903, a Comissão de Irrigação da Índia, criada em 1901, definiu uma política de irrigação, incluindo trabalhos de seleção de áreas, construção e manutenção de obras de irrigação para o combate à fome. Apesar do investimento do governo indiano não ter tido retorno econômico, a curto prazo, em alguns projetos, a Comissão deu um parecer favorável ao programa pois o beneficio social compensaria o investimento (HAGAN; RAISER; EDMINSTER, 1967).

É importante ter em mente o significado real da agricultura irrigada, que possibilita maior produção (mais de um plantio por ano) e produtividade (otimização no uso de áreas), bem como a geração de empregos permanentes, com menores níveis de investimentos, em comparação com outros setores da economia. Isso promove o aumento da renda e a diminuição do êxodo rural, melhorando sensivelmente as condições de vida dos produtores e suas famílias (MANTOVANI; BERNARDO; PALARETTI, 2007).

A irrigação é de extrema importância para o desenvolvimento qualitativo e quantitativo da atividade agrícola. Em países em desenvolvimento existe um grande potencial para o crescimento desta técnica. No entanto, no Brasil existem limitações, pela dependência de produtos importados, difusão de técnicas corretas, além das limitações técnicas e econômicas de nossos agricultores.

A irrigação na agricultura deve ser entendida não somente como um seguro contra secas ou veranicos, mas como uma técnica que possibilita que o material genético expresse em campo todo o seu potencial produtivo (HERNANDEZ, 2010). Além disso, com o uso correto dos métodos, a irrigação é um instrumento muito eficaz no aumento da rentabilidade e economia de água.

A utilização de complementação hídrica em culturas olerícolas é uma necesidade, mesmo na estação chuvosa; haja vista que tais culturas são bastante susceptiveis às deficiências hídricas, ocasionadas pela má distribuição das chuvas. Considerando que as hortaliças constituem um grupo de culturas que têm mais de 80% de água em seu peso, na maioria das espécies, para esse grupo de cultura, a irrigação é um dos tratos culturais que mais favorece o aumento da produtividade e a melhoria da qualidade (FILGUEIRA, 2000).

A tecnologia de irrigação, desde que adequadamente desenvolvida, traz inúmeros benefícios, como o aumento da produção mundial de alimentos, proporcionando desenvolvimento sustentável no campo, com geração de empregos e renda de forma estável. Atualmente, mais da metade da população mundial depende de alimentos produzidos em áreas irrigadas (MANTOVANI; BERNARDO; PALARETTI, 2007; FAGANELLO *et al*., 2007).

Segundo Mantovani, Bernardo e Palaretti (2007), estimativas mundiais de produção indicam que os 260 milhões de hectares irrigados, correspondem a 17% da área cultivada e produzem cerca de 40% da safra. No Brasil, aproximadamente, 3,45 milhões de hectares, correspondem a, aproximadamente, 5% da área cultivada, 16% da produção total e 35% do valor econômico da produção.

2.2.1 Irrigação por aspersão

A aspersão destaca-se pela possibilidade de aplicação em terrenos com declividade maior que os métodos superficiais. Os componentes de um sistema de aspersão, além dos já utilizados para irrigação superficial (tomada d'água, canais adutores, principal e secundário), são: aspersores, acessórios (registros, curvas, redução etc), bomba e tubulações. A água após ser captada da fonte de suprimento, passa por uma bomba que a liga a um canal adutor com um registro e manômetro para controle da pressão e da vazão, depois é ligada às tubulações que a transportam até as estruturas com aspersores, na lavoura. Os aspersores molham as plantas sob a forma de chuva artificial. O diâmetro da gota deve ser tal que não cause prejuízo ao solo, provocando erosão e que não cause prejuízo à cultura. Os aspersores podem ser estacionários ou rotativos, estes últimos podem ter giros parciais ou completos (360^0).

A irrigação por aspersão se constitui num dos métodos mais usados nas últimas décadas no Brasil (MARTINS *et al*., 2008), sendo que, da área total de hortaliças irrigadas mais de 90% são irrigadas por aspersão (FRAVET; CRUZ, 2007), contribuindo para o aumento da área irrigada e do número de empresas fabricantes de equipamentos de irrigação (ROCHA *et al*., 2005).

Segundo Mantovani, Bernardo e Palaretti (2007), a irrigação por aspersão apresenta as seguintes características:

- É o método de irrigação em que a água é aspergida sobre as plantas ou na subcopa, simulando uma precipitação (chuva) natural;
- É um sistema pressurizado, necessitando, geralmente, de sistema de bombeamento;
- É muito utilizado, devido à sua ampla aplicabilidade;
- Apresenta boa uniformidade de aplicação de água (75 a 90%);
- Pode ser feita em sistemas:

a) Móveis: portátil ou semiportátil, em que toda ou parte da tubulação é desmontável; e
b) Fixo: toda a tubulação é fixa no campo.

O vento pode afetar consideravelmente o sistema de irrigação por aspersão, pois este interfere na distribuição da água que cai no solo, podendo deixar o solo mais úmido em alguns lugares e mais secos em outros. Uma alternativa é irrigar em horários que os ventos são menos intensos, a noite, por exemplo. O vento também aumenta a evaporação da água antes mesmo desta atingir o solo, ocasionando uma perda de água e maior custo. A microaspersão é menos afetada pelo vento.

Segundo Castro (2003), as vantagens e desvantagens do sistema de irrigação por aspersão são:

1) Vantagens:

- Não exige sistematização do terreno: economia;
- Mantém a fertilidade natural do solo: não lixívia;
- Pode ser empregada em qualquer tipo de solo, mesmo aqueles com altas taxas de infiltração;
- Terrenos com qualquer declividade (até 30%);
- Permite a aplicação de defensivos e de fertilizantes;
- Permite uma maior economia de água: eficiência de 70 a 95%;
- Elimina (praticamente) as perdas por condução;
- Permite a irrigação durante à noite: economia de energia elétrica;
- Praticamente não prejudica a aeração do solo, resultando em melhor desenvolvimento radicular;
- É fácil de ser implantada em plantações permanentes já estabelecidas.

2) Desvantagens:

- Requer mão de obra habilitada;
- Exige bombeamento para atingir a pressão de serviço: gastos de energia;
- Propicia uma evaporação mais intensa. Problema minorado com irrigação noturna (menor temperatura e menos vento);
- Impacto das gotas nas flores e frutos. Pode propagar doenças, prejudicar a polinização e queda de flores e frutos, quando no início do desenvolvimento;
- Causar erosão do solo;
- Pode lavar os defensivos aplicados na parte aérea;
- Chuvas desuniformes (vento maior que 4 m s^{-1}), minimiza com irrigação a noite;
- Custo inicial elevado;
- Entupimento dos aspersores, minimizado com o uso de filtros.

Os sistemas de irrigação por aspersão estão divididos em: sistema de aspersão convencional, sistema de aspersão em malha, sistema de aspersão por pivô central e sistema de aspersão por autopropelido.

Além dos citados, ainda existem outros sistemas como: ramal rolante, montagem direta, linear etc., que apresentam área irrigada muito inferior à de outros sistemas já mencionados (MANTOVANI; BERNARDO; PALARETTI, 2007).

2.3 O coeficiente de uniformidade

No Brasil, a irrigação emerge nas mais variadas condições de clima, solo, cultura e socioeconomia. Não existe um sistema de irrigação ideal, que seja capaz de atender satisfatoriamente todas as condições existentes e os variados interesses envolvidos. Portanto, deve-se selecionar o sistema de irrigação mais adequado para as condições existentes e que atenda aos objetivos a serem alcançados. Existe ainda um desconhecimento das diversas alternativas de sistemas de irrigação pelos agricultores. A uniformidade de aplicação de água em um sistema de irrigação é o item mais importante, porque a eficiência da irrigação depende muito da uniformidade com a qual a água é distribuída pelos seus emissores.

Uma vez instalado um projeto de irrigação, existe a necessidade de se avaliar as condições previstas inicialmente, se elas se confirmam no campo. Para que isso seja possível. é necessário avaliar as condições de pressão, vazão e lâminas d'água aplicadas.

Os agricultores não dão a importância necessária para a avaliação de sistemas de irrigação por falta de orientação e conhecimento.

De todos os métodos de irrigação utilizados, a irrigação localizada vem apresentando um crescimento contínuo.

Segundo BERNARDO (1995), o termo eficiência representa um balanço entre os volumes de água envolvidos no processo de irrigação. Esses volumes referem-se à quantidade de água captada na fonte e fornecida às parcelas, o volume necessário às plantas, armazenado no solo à profundidade efetiva do sistema radicular das culturas e o volume perdido por deriva, escoamento superficial ou *run-off*, evaporação e percolação.

Um dos fatores que tem contribuído para baixa eficiência da irrigação são os projetos públicos ou público-privados, em que a maioria dos irrigantes não assimila os princípios básicos da agricultura irrigada e seus benefícios. A redução nos canais ou dutos tem mantido a eficiência de condução em valores razoáveis. No entanto, o mesmo não tem ocorrido com a eficiência de aplicação. O aumento da eficiência de aplicação vai ocorrer à medida que o irrigante tomar consciência da necessidade de usar racionalmente a água, o que pode vir com a obrigatoriedade da outorga e taxação do insumo água (COELHO; COELHO FILHO; OLIVEIRA, 2005).

Pode-se obter altos índices de eficiência, empregando-se dimensionamento correto do sistema, equipamentos adequados e manejo racional da água. No sistema de gotejamento em hortaliças e frutas, os valores superam normalmente os 90%. Isso quer dizer que, acima de 90% do volume de água aplicado ficará disponível para a planta. Se a eficiência for baixa, haverá a necessidade de se aplicar um volume maior para compensar as perdas, significando um desperdício de água e energia (HICKEL *et al*., 2012).

A uniformidade pode variar devido a diversos fatores ambientais como velocidade do vento; umidade relativa do ar e temperatura ambiente (FREITAS *et al*., 2003; PAULINO *et al*., 2009).

A uniformidade está associada à variabilidade da lâmina de irrigação, ao longo da área molhada (FRIZZONE, 1992). Segundo Bernardo (1995), a uniformidade pode ser expressa por índices ou coeficientes, sendo mais utilizado o Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC). São também utilizados, em menor escala, o Coeficiente de Uniformidade de Distribuição (CUD) e o Coeficiente Estatístico de Uniformidade (CUE).

A desuniformidade de gotejadores e microaspersores é atribuída, principalmente, à falta de manutenção, a sistemas mal dimensionados ou que estão em uso há muito tempo. Assim, enquanto uma fração de área é irrigada em excesso, em outra ocorre déficit de água, não atendendo às necessidades hídricas das plantas

Segundo Silva e Silva (2005), a desuniformidade em sistemas por microaspersão é presenciada pela elevada precipitação próxima à base dos emissores, atingindo nas extremidades de alcance do jato valores muito pequenos, chegando a praticamente zero.

No sistema intensivo de agricultura irrigada, quase sempre, os produtores não dispõem de tempo para revisar os equipamentos de irrigação que, em geral, são usados durante anos, sem que haja revisão da motobomba ou substituição dos reguladores de pressão, os quais têm vida útil relativamente reduzida (GUERRA, 2010). Este comportamento causa má distribuição de água no solo, resultando em menor produtividade ano a ano nas lavouras irrigadas.

Em sistemas pressurizados, a motobomba deve ser checada constantemente, pois geralmente ocorre o desgaste de suas partes internas, causado por pedregulhos e em função da qualidade da água de irrigação. Outra situação comumente encontrada é a falta de pressão no final das linhas de distribuição, devido ao envelhecimento e corrosão das paredes internas das tubulações, o que provoca aumento da perda de carga (GUERRA, 2010).

A uniformidade de irrigação é influenciada por uma série de fatores: pressão de serviço; diâmetro dos bocais, geometria e rugosidade dos orifícios; inclinação e velocidade de lançamento do jato; altura do emissor em relação ao solo; estabilidade da haste de sustentação do emissor, que deve ser mantida sempre na vertical; distância dos

microaspersores em relação ao caule das plantas e a interferência na interceptação do jato (COSTA, 1994); e, principalmente fatores climáticos, como a velocidade e direção do vento (CONCEIÇÃO, 2002).

As perdas de água nos sistemas por microaspersão são, normalmente, maiores do que na irrigação por gotejamento. Isso ocorre devido à maior superfície molhada de solo e porque a água é lançada ao ar. Mesmo operando próximo à superfície do solo, os microaspersores têm sua uniformidade afetada significativamente pelo vento resultando em arraste das gotas numa determinada direção.

Frizzone e Dourado Neto (2003) consideram que a uniformidade de aplicação da água deve ser entendida como um elemento decisório no planejamento e operação dos sistemas de irrigação, sendo fundamental para a obtenção da máxima produtividade da lavoura e/ou rentabilidade da área irrigada.

Em relação à distribuição espacial da água aplicada, a uniformidade do sistema de irrigação é quantificada por meio de um coeficiente de uniformidade. Muitos coeficientes são utilizados para expressar a variabilidade de distribuição da água na irrigação por aspersão.

O Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC) adota o desvio médio absoluto como medida de dispersão (CHRISTIANSEN, 1942), utilizando a Equação (1):

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

em que:

CUC = Coeficiente de Uniformidade de Christiansen , (%);

X_i = lâmina coletada no ponto i, (mm), para i = 1,...,n;

$\overline{X}$ = lâmina média, (mm);

n = número de coletores.

O Coeficiente de Uniformidade de Distribuição (CUD) relaciona a lâmina média aplicada na quarta parte total, que recebe menos água, com a lâmina média aplicada na área total (CRIDDLE, 1956). É descrita pela Equação (2):

$$CUD = 100\left(\frac{\overline{X}_{0,25}}{\overline{X}}\right) \quad (2)$$

em que:

CUD = coeficiente de uniformidade de distribuição, (%);

$\overline{X}_{0,25}$ = lâmina média de ¼ do total de pluviômetros com as menores lâminas, (mm).

O Coeficiente de Uniformidade Estatístico utiliza o desvio padrão (σ) como medida de dispersão (WILCOX; SWAILES, 1947), calculado pela Equação (3):

$$CUE = 100 - CV \tag{3}$$

em que:

CUE = coeficiente de uniformidade estatístico, (%);

CV = coeficiente de variação, (%);

σ = desvio padrão.

$$CV = \left(\frac{\sigma}{\overline{X}} \right) 100$$

Zocoler (2005) estima que o ideal em sistemas de irrigação por gotejamento é que a uniformidade atinja um valor de CUC superior a 90% e CUD entre 85% - 90%. Martins *et al*. (2008) descrevem para o CUE valores acima de 75%, em sistemas de irrigação por aspersão. Já Bernardo, Soares e Mantovani (2007) classificam uma uniformidade alta quando o CUC é igual a 95%, média com o CUC igual a 75% e baixa com o CUC igual a 55%. Afirmam, ainda, que a irrigação por aspersão apresenta valores de eficiência de uniformidade da ordem de 75% a 90%.

2.4 Controle de processo

Os métodos estatísticos são técnicas eficazes para a melhoria de processos e redução de defeitos. Entretanto, é preciso que se considere que as técnicas estatísticas só são eficazes quando aplicadas adequadamente. As técnicas estatísticas conferem objetividade e exatidão à observação, dão maior importância aos fatos ao invés de conceitos abstratos, usam evidências obtidas a partir de resultados específicos da observação, entretanto devem ser verificados os erros e variações, aceitando o padrão regular, que aparece em grande parte dos resultados observados, como uma informação confiável (KUME, 1989).

Quando uma experimentação é realizada e são produzidos produtos, as características deste produto irão apresentar uma variabilidade inevitável, devido à variação sofrida pelos fatores que compõem o processo. Estas variações podem resultar de diferenças entre as mudanças das condições ambientais, variação entre lotes de matérias-primas, entre outras. Apesar de um esforço considerável ser especificamente direcionado para controlar a variabilidade em cada um desses fatores, existirá sempre a

variabilidade no produto acabado de cada processo de uma empresa. Portanto, é importante que esta variabilidade também seja controlada, para que possam ser fabricados produtos de boa qualidade.

É importante verificar sempre a estabilidade do processo, já que processos instáveis, provavelmente, resultarão em produtos defeituosos, perda de produção, baixa qualidade e, de modo geral, em perda da confiança.

Em 1924, Shewardt, um estatístico americano apresentou as chamadas Cartas de Controle, como um método para a análise e ajuste da variação de um processo em função do tempo. Nas Cartas descreveu o processo considerando duas características fundamentais: centralização - determinada pela média; e dispersão - verificada pelo desvio-padrão ou amplitude.

2.4.1 Cartas de controle para variáveis

2.4.1.1 Cartas de controle $\overline{X}$ e *S* (Média e desvio padrão)

Normalmente, o gráfico $\overline{X}$ é utilizado com o objetivo de controlar a média do processo, enquanto o gráfico ***S*** é empregado para o controle da variabilidade do processo considerado. É evidente que o procedimento usando o desvio padrão da amostra e muito mais eficiente estatisticamente. Além disto, a determinação de ***S*** implica treinamento e calculadoras apropriadas.

Apresentam-se, a seguir, as expressões para o cálculo dos limites de controle dos gráficos $\overline{X}$ e *S*:

1) Gráfico da média $\overline{X}$:

   LSCX = $\overline{\overline{X}} + A_3 * \overline{s}$ *Limite superior de controle;*

   LMCX = $\overline{\overline{X}}$ linha central;

   LICX = $\overline{\overline{X}} - A_3 * \overline{s}$ *limite inferior de controle.*

2) Gráfico do desvio padrão *S*:

   LSCs = $B_4 * \overline{s}$ *limite superior de controle;*

   LMCs = $\overline{s}$ *linha média;*

   LICs = $B_3 * \overline{s}$ *, limite inferior de controle.*

sendo:

$$\overline{\overline{X}} = \frac{1}{m}\sum_{i=1}^{n} \overline{X}_i \ , \qquad (4)$$

com $\overline{X}_i$: a média da i-ésima amostra, para i = 1,...,*m*;

$$\bar{s} = \frac{1}{m}\sum_{i=1}^{n} S_i \,, \tag{5}$$

sendo S_i , é o desvio padrão da i-ésima amostra, para i = 1,...,*m*;

$$S_i = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{j=1}^{n}(X_{ij} - \overline{X}_i)^2} \tag{6}$$

X_{ij} é a observação na i-ésima amostra, na i-ésima repetição, i = 1,...,n; j = 1,...,m.

Os valores de A_3, B_3 e B_4 são obtidos de pesquisa em tabela adequada, disponível no Anexo A deste trabalho (MONTGOMERY, 2004).

2.4.1.2 Carta *X* individual e *AM*

Muitas vezes, as amostras utilizadas na construção dos gráficos de controle têm tamanhos unitários, isto é, *n* = 1.

Os gráficos de controle utilizados para *n* = 1 são denominados gráficos para medidas individuais.

Para construir a carta correspondente, composta por dois gráficos, adota-se como: $\overline{X}$: a média dos valores individuais; AM_i: a amplitude móvel de duas observações sucessivas para estimar a variabilidade do processo, conforme Equação 7:

$$AM_i = | X_i - X_{i-1} |. \tag{7}$$

Apresentam-se, a seguir, as expressões para o cálculo dos limites de controle dos gráficos *X* e *AM*.

1) Gráfico *X*:

   LSCX = $\overline{X}$ + 3 $A\overline{M}$ /d_2

   LMCX = $\overline{X}$

   LICX = $\overline{X}$ - 3 $A\overline{M}$ /d_2

2) Gráfico *AM*:

   LSCAM = D_4 $A\overline{M}$

   LMCR = $A\overline{M}$

   LICR = D_3 $A\overline{M}$

sendo, $\overline{AM}$ a amplitude móvel média, d_2 , D_3 e D_4 devem ser obtidos da tabela do Anexo A, para n = 2, já que o gráfico é baseado em uma amplitude móvel de n = 2 (MONTGOMERY, 2004).

2.4.2 Capacidade de processos

Um processo é estável quando as variações que nele ocorrem não são provocadas por causas especiais, mas apenas por causas aleatórias. Um processo estável apresenta previsibilidade. No entanto, é possível que, mesmo um processo com variabilidade controlada e previsível, produza itens defeituosos. Logo, não é suficiente simplesmente colocar e manter um processo sob controle. É fundamental avaliar se o processo é capaz de atender às especificações estabelecidas a partir dos desejos e necessidades do cliente. É justamente esta avaliação que constitui o estudo da capacidade do processo.

2.4.2.1 Índices de capacidade do processo

Para medir o quanto o processo é capaz de atender às especificações, utiliza-se o que se chama de índices de capacidade, que são dois:

- Potencial do processo (C_p);
- Desempenho do processo (C_{pk}).

Segundo Werkema (1996), para utilizar os índices de capacidade é necessário que:

- O processo esteja sob controle estatístico;
- A variável de interesse tenha distribuição próxima da normal.

Ressalte-se que, para o cálculo destes itens, deve-se ter pelo menos 30 valores de controle para que os resultados tenham significado estatístico.

Os índices de capacidade processam as informações de forma que seja possível avaliar se um processo é capaz de gerar produtos que atendam às especificações provenientes dos clientes internos e externos.

Estes índices são números adimensionais que permitem uma quantificação do desempenho do processo.

2.4.2.2 Potencial do processo ou capacidade do processo (C_p)

Caso a variável de interesse tenha especificações bilaterais, o Índice de Capacidade de Processo C_p (Process Capability Ratios - PCR) é definido pela Equação 8:

$C_p = \frac{LSE - LIE}{LSC - LIC}$ que é equivalente a $C_p = \frac{LSE - LIE}{6\sigma}$ (8)

em que:

- LIE e LSE são os limites inferior e superior de especificações, respectivamente;
- LIC e LSC são os limites inferior e superior de confiança, respectivamente;
- σ é o desvio padrão populacional da variável em estudo.

Observe-se que o índice C_p relaciona àquilo que se deseja produzir (*LSE - LIE*), que corresponde à variabilidade permitida ao processo, com a variabilidade natural do processo (6σ). É fácil perceber que quanto maior for o valor C_p, maior será a capacidade do processo em satisfazer às especificações, desde que a média μ esteja centrada no valor nominal.

Como o desvio padrão σ é desconhecido, devemos substituí-lo por uma estimativa $\hat{\sigma}$.

Onde:

$\hat{\sigma}$ = $\frac{\bar{s}}{c_4}$ para o gráfico de controle $\overline{X}$ e *S;*

$\hat{\sigma}$ = *S* (desvio padrão amostral) para o gráfico X individual *AM*.

Assim, o estimador de C_p é dado pela Equação 9:

$$\hat{C}_p = \frac{LSE - LIE}{6\hat{\sigma}} \quad (9)$$

Classificação do processo, por Montgomery (2004):

- Se o valor de $C_p \geq 1{,}33$, o processo é capaz ou adequado, segundo as especificações (Verde);
- Se $1 \leq C_p < 1{,}33$, o processo é aceitável (Amarelo);
- Se $C_p < 1$, o processo é incapaz ou inadequado (Vermelho).

A definição de C_p assume implicitamente que o processo está centrado no valor nominal da especificação. Se o processo não estiver centrado, sua capacidade real será menor do que a indicada por C_p. Portanto, é conveniente pensar em C_p como uma medida de capacidade potencial, isto é, a capacidade de um processo centrado no valor nominal.

O índice C_p tem uma interpretação natural, já que $(1/C_p)$x100 é a percentagem da faixa de especificação utilizada pelo processo.

2.4.2.3 Índice de desempenho de processo (C_{pk})

O índice C_{pk} permite avaliar se o processo está sendo capaz de atingir o valor nominal da especificação, já que ele leva em consideração o valor da média do processo. Logo, o índice C_{pk} pode ser interpretado como uma medida de capacidade real do processo e é definido por:

C_{pk} = Min { C_{pu} , C_{pl}}

em que:

$$C_{pu} = \frac{LSE - \mu}{3\sigma} \qquad \text{e} \qquad C_{pl} = \frac{\mu - LIE}{3\sigma} \tag{10}$$

Posto que μ e σ são parâmetros desconhecidos, os estimadores de C_{pu} e C_{pl} são, respectivamente:

$$\hat{C}_{pu} = \frac{LSE - \overline{\overline{X}}}{3\hat{\sigma}} \qquad \text{e} \qquad \hat{C}_{pl} = \frac{\overline{\overline{X}} - LIE}{3\hat{\sigma}}$$

Note que C_{pk} é calculado em relação ao limite de especificação mais próximo da média do processo. Quando a média do processo coincide com o valor nominal da especificação, tem-se que $C_p = C_{pk}$.

Se $C_{pk} < C_p$ o processo esta fora do ponto de especificação.

2.4.2.4 Índice de capacidade para situações em que há apenas um limite de especificação

Quando existe apenas o limite inferior de especificação:

$$C_{pI} = \frac{\overline{\overline{X}} - LIE}{3\hat{\sigma}} \tag{11}$$

Quando existe apenas o limite superior de especificação

$$C_{pu} = \frac{LSE - \overline{\overline{X}}}{3\hat{\sigma}} \tag{12}$$

Novamente será usual utilizar estimativas da média e do desvio padrão do processo para calcular os índices da capacidade nas situações em que há apenas um limite de especificação.

2.5 Geoestatística

A geoestatística tem como fundamento a Teoria das Variáveis Regionalizadas que considera a distribuição espacial das medidas, permitindo definir a estrutura da variabilidade espacial e o raio de dependência espacial entre elementos amostrais, considerando: localização, continuidade espacial e isotropia dos dados (não existe direção privilegiada). No estudo da geoestatística, os valores são conhecidos por meio de elementos amostrais que são coletados em localizações específicas, por meio de suas coordenadas geográficas.

A continuidade espacial apresentada pelas variáveis regionalizadas entre elementos amostrais vizinhos reflete o grau de dependência espacial entre eles. Quando não é identificada a dependência espacial, entende-se que não há autocorrelação espacial entre elementos amostrais e, consequentemente, há presença de efeito de pepita puro. Isto é, a distância entre os elementos amostrais pode ter sido muito grande a ponto de não identificar a variabilidade espacial da variável em estudo (BORSSOI; URIBE-OPAZO; GALEA, 2009).

A geoestatística tem um conjunto de técnicas determinísticas e inferenciais para compreender e modelar a variabilidade espacial de variáveis espacialmente georreferenciadas.

Usando métodos geoestatísticos, Scherpinski *et al*. (2010) avaliaram a variabilidade espacial dos atributos hídricos do solo e construíram mapas temáticos. Souza *et al*. (2007), com o uso da técnica de geoestatística, obtiveram a descrição dos atributos do solo, o que permitiu a definição de zonas de manejo, indicando os locais de déficit e excesso.

Ainda que a variável regionalizada seja contínua no espaço, geralmente não é possível conhecer os seus valores em todos os pontos, mas somente em alguns que foram obtidos por amostragem. O tamanho, a forma, a orientação e o arranjo espacial dessas amostras constituem o suporte da variável regionalizada, que apresentará características diferentes, se qualquer desses atributos for modificado. No estudo do comportamento das variáveis regionalizadas têm-se ferramentas fundamentais dos métodos geoestatísticos: os modelos espaciais, a isotropia dos dados, o semivariograma, os modelos teóricos espaciais e a krigagem, e a isotropia dos dados que é uma característica da estrutura de dependência espacial da variável regionalizada.

A aplicação dos métodos da estatística tradicional de Fischer na experimentação agrícola, para que se possa empregar inferência estatística, está vinculada à observação dos pressupostos básicos da independência entre observações, à aleatorização e a ter a mesma distribuição de probabilidade. No entanto, diversos trabalhos têm comprovado que observações vizinhas, de variáveis do solo, apresentam correlação ou dependência espacial, entre eles: Vieira *et al*. (1983), Prevedello (1987), Scott *et al*. (1994), Cambardella *et al*. (1994), Cahn, Hummel e Brouer (1994), Paz, Taboada e Gómez (1996), Souza (1999), Mercante, Uribe-Opazo e Souza (2003) e Scherpinski *et al*. (2010). Outros trabalhos têm evidenciado que observações vizinhas de atributos da planta também não são independentes e seguem comportamento espacial, como os de: Tabor *et al*.(1984), Vieira *et al*. (1987), Mulla (1993) e Salviano, Vieira e Sparovek (1995).

Se a distribuição espacial dos elementos amostrais for observada e levada em consideração, será possível ter vantagem da mesma. É oportuna a observação de Reichardt, Vieira e Libardi (1986), de que a estatística tradicional e a geoestatística se completam. Uma não exclui a outra, perguntas não respondidas por uma, muitas vezes, podem ser respondidas pela outra.

2.5.1 Modelo espacial linear

A modelagem espacial depende, em especial, da estrutura da matriz de covariância do processo estocástico gaussiano $\{Z(s_i),\ s_i \in S\}$, em que $S \subset \mathcal{R}^2$, onde $\mathcal{R}^2$ é o espaço euclidiano, bi-dimensional (MARDIA; MARSHALL, 1984), onde o processo $Z = (Z(s_1),..., Z(s_n))^T$, em que: s_i e s_u $(i,u = 1,..., n)$ são localizações espaciais conhecidas, têm distribuição gaussiana n-variada com vetor de médias $\mu 1$ e matriz de covariância Σ, isto é: $Z \sim N_n(\mu 1, \Sigma)$, em que μ é uma constante; 1 é um vetor de uns de dimensão $nx1$ e Σ é uma matriz definida positiva, n x n, dada por $\Sigma = [(\sigma_{iu})]$, em que $\sigma_{iu} = Cov[(Z(s_i), Z(s_u))] = C(s_i, s_u)$. Supondo que os dados são descritos pelo modelo da Equação (13):

$$Z(s_i) = \mu(s_i) + \varepsilon(s_i) \qquad (13)$$

em que: $\mu(s_i)$ e $\varepsilon(s_i)$ podem depender da localização espacial de qual $Z(s_i)$ foi obtida. Assume-se que o erro estocástico ε tem média zero, ou seja: $E[\varepsilon(s_i)] = 0$, e que a variação entre pontos no espaço é determinada por alguma função de covariância $C(s_i, s_u) = Cov[\varepsilon(s_i), \varepsilon(s_u)]$. Para algumas funções conhecidas de s_i, assume-se também que $x_1(s_i), x_2(s_i),..., x_p(s_i)$, a média do processo estocástico é dada pela Equação (14):

$$\mu(s_i) = \sum_{u=1}^{p} x_u\,(s_i)\,\beta_u, \quad i = 1, \ldots, n \tag{14}$$

em que os parâmetros β_1,..., β_p são desconhecidos, a serem estimados.

A função de covariância $C(s_i, s_u)$ é usada no estudo da dependência espacial do processo intrinsecamente estacionário e, também, especificada por um vetor $\theta = (\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3)^T$. Por simplicidade, pode-se utilizar as seguintes notações: $Z(s_i) = z_i$, $Z = (z_1, \ldots, z_n)^T$, $x_{iu} = x_u(s_i)$, $x_i^T = (x_{i1}, \ldots, x_{ip})$, em que X é uma matriz nxp com suas linhas x_i^T, $\beta = (\beta_1, \ldots, \beta_p)^T$, $\varepsilon_i = \varepsilon(s_i)$, $\varepsilon = (\varepsilon_1, \ldots, \varepsilon_n)^T$, com $i = 1, \ldots, n$ e $u = 1, \ldots, p$.

Portanto, obtém-se a Equação (15):

$$z_i = x_i^T\beta + \varepsilon_i\,. \tag{15}$$

Que, na forma matricial, pode ser expressa pela Equação (16):

$$Z = X\beta + \varepsilon. \tag{16}$$

Assume-se que Σ é não singular e que X tem posto completo. Considerando-se, de maneira particular, a forma paramétrica da matriz de covariância, tem-se a Equação (17):

$$\Sigma = \varphi_1 I_n + \varphi_2 R. \tag{17}$$

em que:

- φ_1 é o efeito pepita ou erro de variância ($\varphi_1 \geq 0$);
- φ_2 é a contribuição ou variância de dispersão ($\varphi_2 \geq 0$);
- R é uma matriz cujos elementos estão em função de φ_3, ou seja: $R = R(\varphi_3) = [(r_{iu})]$, matriz n x n simétrica com seus elementos da diagonal $r_{iu} = 1$, e $C(s_i, s_u) = \varphi_2 r_{iu}$, para $i \neq u = 1, \ldots, n$, em que φ_3 ($\varphi_3 > 0$) é função do alcance (a) do modelo; I_n é a matriz identidade, n x n.

A forma paramétrica da matriz de covariância Σ, representada na Equação 5, ocorre para vários processos isotrópicos, nos quais a covariância $C(s_i, s_u)$ é definida segundo a função de covariância $C(h_{iu}) = \varphi_2 r_{iu}$, em que $h_{iu} = ||s_i - s_u||$ é a distância euclidiana entre os pontos s_i e s_u .

Nas funções de covariâncias $C(h_{iu})$, a variância do processo estocástico Z e $C(0) = \varphi_1 + \varphi_2$. Portanto, a semivariância pode ser definida na Equação (18)

$$\gamma\,(h) = C(0) - C(h) \tag{18}$$

Sendo $\gamma\,(h) = \frac{1}{2}\,E\,[(Z(s) - Z(s+h))^2]$ um estimador da função semivariância, conhecido como o estimador de Matheron (1963), definido na Equação (19):

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [(Z(s_i) - Z(s_i + h))^2] \quad (19)$$

em que *N*(h) é o número de pares $Z(s_i) - Z(s_i + h)$ na distância h.

Cressie e Hawkins (1980) sugerem um estimador da semivariância, dado pela Equação (20), o qual alivia o impacto negativo de observações discrepantes, oferecendo estimativas estáveis.

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2} \cdot \frac{\left[N(h)^{-1} \sum_{N(h)} \sqrt{|(Z(s+h) - Z(s))|} \right]^4}{0{,}457 + \frac{0{,}494}{N(h)}} \quad (20)$$

2.5.2 Semivariograma

O semivariograma é um gráfico da função semivariância *γ(h) versus h,* utilizado para analisar o grau de dependência espacial entre elementos amostrais dentro de um campo experimental, além de definir o modelo e estimar os parâmetros de variabilidade espacial necessários para a estimativa de valores para locais não amostrados, por meio da técnica de krigagem (VIEIRA, 2000; BORSSOI; URIBE-OPAZO; GALEA, 2009).

A estrutura de dependência espacial é definida por meio do semivariograma ou pela função covariância, ajustando um modelo teórico à função semivariância (ou à função covariância) e estimando seus parâmetros por métodos estatísticos. Os parâmetros que definem a estrutura de variabilidade espacial $\theta = (\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3)^T$, na Equação 17, são definidos a seguir:

- Alcance ($a = g(\varphi_3) > 0$): distância dentro da qual os elementos amostrais apresentam-se correlacionados espacialmente. Assim, o alcance delimita a distância a partir da qual o valor da variável, numa localização em estudo, não tem mais influência sobre a localização vizinha; além disso, o alcance é uma função do parâmetro φ_3, em que *g* representa uma função;
- Efeito pepita ($\varphi_1 \geq 0$): idealmente $\gamma(0) = 0$, ou seja, na teoria, quando a distância *h* é zero o valor da semivariância é igual a zero. Entretanto, na prática, à medida que *h* tende para zero, $\gamma(h)$ se aproxima de um valor positivo chamado efeito pepita *(nugget effect)*, que revela a descontinuidade do semivariograma para distâncias menores do que a menor distância entre as amostras. Este revela a descontinuidade do semivariograma para distâncias menores que a menor distância entre as amostras. Conforme relatou Cressie

(1993), essa descontinuidade pode ser gerada por erros de análise ou de variabilidade de pequena escala não captada pela amostragem;

- Contribuição ($\varphi_2 \geq 0$): é conhecido como *Sill* e é a diferença entre o patamar (C) e o Efeito pepita (φ_1);
- Patamar ($C = \varphi_1 + \varphi_2$): é o valor no qual $\gamma(h)$ se estabiliza e a distância h correspondente ao alcance (a). Deste ponto em diante, considera-se que não existe mais dependência espacial entre as amostras, porque a variância da diferença entre pares de amostras ($VAR\,[Z(s_i) - Z(s_i + h)]$) torna-se invariante com a distância.

Na Figura 2, apresenta-se um exemplo gráfico da relação entre a covariância espacial $C(h)$ e a semivariância $\gamma(h)$, apresentada na Equação 18.

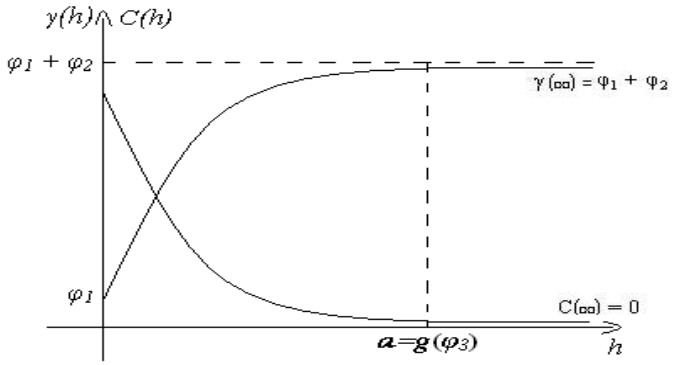

Figura 1 Relação entre a função de covariância espacial $C(h)$ e a semivariância $\gamma(h)$.

A partir da função semivariância apresentada na Equação (18), tem-se a relação $C(h) = C(0) - \gamma(h)$. Além disso, dividindo por $C(0)(C(0) \neq 0)$, tem-se:

$$\frac{C(h)}{C(0)} = \frac{C(0)}{C(0)} - \frac{\gamma(h)}{C(0)}$$

$$\frac{C(h)}{C(0)} = 1 - \frac{\gamma(h)}{C(0)}$$

Logo, a função de correlação espacial é da forma apresentada na Equação (21):

$$\rho(h) = 1 - \frac{\gamma(h)}{\varphi_1 + \varphi_2} \tag{21}$$

2.5.3 Anisotropia

A isotropia é uma característica de quando a variabilidade espacial em uma área apresenta comportamento semelhante para direções distintas, variando valores de forma significativa e ocorrendo, então, anisotropia (SOUZA *et al*., 1999).

A anisotropia pode ser identificada pelo gráfico do semivariograma, obtido para diferentes direções. Na Figura 2, podem ser visualizadas as convenções direcionais.

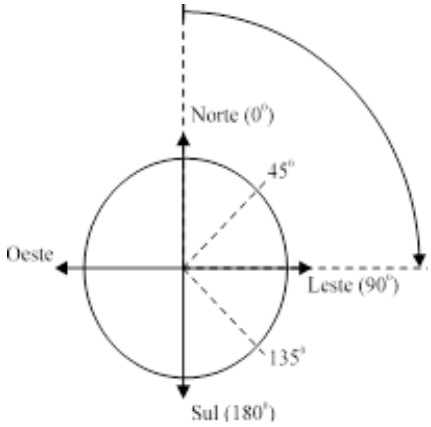

Figura 2 Convenções direcionais usadas na geoestatística.

Se os semivariogramas não apresentam o mesmo comportamento em todas as direções a distribuição é denominada anisotrópica. Os modelos mais comuns são anisotropia geométrica, anisotropia zonal e combinada (geométrica e zonal). A geométrica caracteriza-se quando os semivariogramas apresentam o mesmo modelo, com o mesmo patamar em todas as direções, mas com diferentes alcances, verificando-se os alcances máximos e mínimos em direções perpendiculares (exemplo: direções 0º e 90º). A anisotropia zonal caracteriza-se quando o semivariograma, construído para diferentes direções, apresenta diferentes patamares (GUEDES *et al*., 2008).

Quando se verifica uma similaridade, as funções semivariância nas direções 0º, 45º 90º e 135º, até a representação da distribuição espacial do fenômeno, é denominada isotrópica. Neste caso, um único modelo é suficiente para descrever a variabilidade espacial do fenômeno em estudo.

2.5.4 Modelos teóricos espaciais

A seguir, são apresentados os modelos teóricos mais utilizados da função semivariância, da função covariância e da função correlação, apresentados por Isaaks e Srivastava (1989) e Cressie (1993), que são divididos em modelos transitivos (possuem

patamar) e não transitivos (não possuem patamar). Os modelos transitivos mais utilizados são: esférico, exponencial, gaussiano, circular e Matérn. Conforme Journel e Huijbregts (1997), estes modelos consideram que a variável possui um mesmo padrão de continuidade espacial em todas as direções (isotropia), com isso, o semivariograma deve ter uma mesma característica estrutural em todas as direções do espaço.

Apresentamos os modelos esférico, exponencial e gaussiano válidos em $\mathcal{R}$, $\mathcal{R}^2$ e $\mathcal{R}^3$, conforme Cressie (1993).

i. Modelo esférico: apresenta crescimento rápido na origem e atinge o patamar a 2/3 do alcance, a semivariância teórica tem como expressão a Equação (22):

$$\gamma(h) = \begin{cases} 0, & h = 0 \\ \varphi_1 + \varphi_2 \left[\frac{3}{2}\left(\frac{h}{\varphi_3}\right) - \frac{1}{2}\left(\frac{h}{\varphi_3}\right)^3\right], & 0 < h \leq \varphi_3 \\ \varphi_1 + \varphi_2, & h > \varphi_3 \end{cases} \tag{22}$$

A função de covariância é expressa pela Equação (23):

$$C(h) = \begin{cases} \varphi_1 + \varphi_2, & h = 0 \\ \varphi_2 \left[1 - \frac{3}{2}\left(\frac{h}{\varphi_3}\right) + \frac{1}{2}\left(\frac{h}{\varphi_3}\right)^3\right], & 0 < h \leq \varphi_3 \\ 0, & h > \varphi_3 \end{cases} \tag{23}$$

A função de correlação espacial é definida na Equação (24):

$$\rho(h) = \begin{cases} 1, & h = 0 \\ 1 - \frac{3}{2}\left(\frac{h}{\varphi_3}\right) + \frac{1}{2}\left(\frac{h}{\varphi_3}\right)^3, & 0 < h \leq \varphi_3 \end{cases} \tag{24}$$

ii. Modelo exponencial: apresenta comportamento aproximadamente linear na origem e atinge o patamar assintoticamente, com alcance prático definido como a distância na qual o valor do modelo e 95% de φ_2, sendo o alcance prático dado por $a = 3\varphi_3$, a semivariância teórica tem como expressão a Equação (25):

$$\gamma(h) = \begin{cases} 0, & h = 0 \\ \varphi_1 + \varphi_2 \left[1 - exp\left(-\frac{h}{\varphi_3}\right)\right], & h > 0 \end{cases} \tag{25}$$

A função de covariância é expressa pela Equação (26):

$$C(h) = \begin{cases} \varphi_1 + \varphi_2, & h = 0 \\ \varphi_2 \left[exp\left(-\frac{h}{\varphi_3}\right)\right], & h > 0 \end{cases} \tag{26}$$

A função de correlação espacial é definida na Equação (27):

$$\rho(h) = \begin{cases} 1, & h = 0 \\ \left[exp\left(-\frac{h}{\varphi_3}\right)\right], & h > 0 \end{cases} \quad (27)$$

iii. Modelo gaussiano: apresenta comportamento parabólico na origem e é utilizado para modelar um fenômeno extremamente contínuo. Também atinge o patamar apenas assintoticamente e o alcance prático é dado por $a = \sqrt{3}\,\varphi_3$. A semivariância teórica tem como expressão a Equação (28):

$$\gamma(h) = \begin{cases} 0, & h = 0 \\ \varphi_1 + \varphi_2 \left\{1 - exp\left[-\left(\frac{h}{\varphi_3}\right)^2\right]\right\}, & h > 0 \end{cases} \quad (28)$$

A função de covariância é expressa pela Equação (29):

$$C(h) = \begin{cases} \varphi_1 + \varphi_2, & h = 0 \\ \varphi_2 \left\{exp\left[-\left(\frac{h}{\varphi_3}\right)^2\right]\right\}, & h > 0 \end{cases} \quad (29)$$

A função de correlação espacial é definida na Equação (30):

$$\rho(h) = \begin{cases} 1, & h = 0 \\ \left[exp\left(-\frac{h}{\varphi_3}\right)^2\right], & h > 0 \end{cases} \quad (30)$$

iv. Família Matérn: apresenta uma função chamada família Matérn (MATÉRN, 1986), definida, em termos de modelo teórico de semivariância, pela Equação (31):

$$\gamma(h) = \begin{cases} 0, & h = 0 \\ \varphi_1 + \varphi_2 \left[1 - \left(2^{k-1}\Gamma(k)\right)^{-1} \left(\frac{h}{\varphi_3}\right)^k k_k \left(\frac{h}{\varphi_3}\right)\right], & h > 0 \end{cases} \quad (31)$$

em que: φ_1, φ_2, φ_3 e k, são parâmetros a estimar e K_k é a função de Bessel de terceiro tipo, de ordem k. A família Matérn é válida para φ_3, $k > 0$ e corresponde à função semivariância exponencial, quando o parâmetro de forma $k = 0{,}5$ e à função semivariância gaussiana quando $k \rightarrow \infty$.

A função de covariância e expressa pela Equação (32):

$$C(h) = \begin{cases} 0, & h = 0 \\ \varphi_2 \left[\left(2^{k-1}\Gamma(k)\right)^{-1} \left(\frac{h}{\varphi_3}\right)^k k_k \left(\frac{h}{\varphi_3}\right)\right], & h > 0 \end{cases} \quad (32)$$

A função de correlação espacial e definida na Equação (33):

$$\rho(h) = \{2^{k-1}\Gamma(k)\}^{-1}\left(\frac{h}{\varphi_s}\right)^k k_k\left(\frac{h}{\varphi_s}\right), \qquad h > 0 \tag{33}$$

2.5.5 Método de estimação de parâmetros

No ajuste de modelos teóricos a semivariogramas experimentais, existem vários métodos de estimação dos parâmetros efeito pepita (φ1), contribuição ou sill (φ2) e alcance (a), que caracterizam a estrutura de dependência espacial.

O método de estimação de parâmetros de mínimos quadrados ordinários - OLS (CRESSIE, 1985) consiste na obtenção de um vetor de parâmetros $\hat{\theta}$ estimador de θ = (φ1, φ2, φ3)T, que minimiza a Equação (34):

$$\sum_{j=1}^{k}[\hat{\gamma}(h_j) - \gamma(h_j, \hat{\theta})]^2 \tag{34}$$

em que:

k = número de lags que constituem o semivariograma experimental;

$\hat{\gamma}(h_j)$ = valor estimado da semivariância experimental, obtido da Equação (19) ou (20), que correspondente ao j-ésimo lag, para j =1,...,k;

$\gamma(h_j, \hat{\theta})$ = valor estimado correspondente ao j-ésimo *lag*, para j = 1,...,k; obtido pelo modelo ajustado ao semivariograma experimental, e depende do vetor de parâmetros $\hat{\theta}$.

O método de estimação de parâmetros WLS1 (MCBRATNEY; WEBSTE, 1986) é um método de estimação de mínimos quadrados ponderados, com pesos diretamente proporcionais ao número de pares de pontos amostrais, que contribuem para a semivariância estimada a cada *lag*. Neste método, o vetor de parâmetros $\hat{\theta}$ a ser estimado é o que minimiza a Equação 35:

$$\sum_{j=1}^{k} N(h_j).[\hat{\gamma}(h_j) - \gamma(h_j, \hat{\theta})]^2 \tag{35}$$

Em qualquer dos casos, OLS e WLS1, os ajustes são feitos de forma iterativa, a partir de um vetor de parâmetros inicial θ_0, que pode ser escolhido por meio de ajuste visual. Diggle e Ribeiro Jr. (2007) observam que, sem o uso de restrições adequadas com respeito

aos parâmetros a serem impostos no problema de otimização, os métodos de mínimos quadrados podem apresentar como melhor ajuste, modelos não válidos, estimando, por exemplo, parâmetros negativos ou alcance maior que a distância máxima da área estudada.

A estimação de parâmetros de Máxima Verossimilhança - MV é um método analítico, muito utilizado na teoria estatística. Para a estimação do vetor de parâmetros $\delta = (\beta, \theta^T)^T$, em que θ = $(\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3)^T$, escolhe-se um vetor $\hat{\delta}$ =$(\hat{\beta}, \hat{\theta}^T)^T$ que maximiza a função verossimilhança no domínio Θ, sendo Θ o espaço paramétrico. Mardia e Marshall (1984) consideram um processo estocástico Gaussiano $\{Z(s_i), s_i \in S\}$, em que $S \subset R^2$, sendo R^2 espaço Euclidiano bidimensional, isto é, o processo estocástico $Z = (Z(s_1),...,Z(s_n))^T$ tem distribuição gaussiana *n*-variada com vetor de médias $\beta 1$ e matriz de covariância $\Sigma(\theta)$; $Z \sim N_n(\beta 1, \Sigma(\theta))$, em que β é uma constante; 1 é um vetor de uns *nx1;* e $\Sigma(\theta)$ é uma matriz definida positiva *nxn,* dada por $\Sigma(\theta) = [Cov(Z(s_i), Z(s_j))]$. O método de estimação de MV de δ consiste em maximizar o logaritmo da função de verossimilhança, definida na Equação (36):

$$l(\beta, \theta) = -\frac{n}{2}\log(2\pi) - \frac{1}{2}\log|\Sigma(\theta)| - \frac{1}{2}(Z - \beta 1)^T \Sigma(\theta)^{-1} (Z - \beta 1). \quad (36)$$

Outro método, frequentemente, utilizado para estimar os parâmetros da matriz de covariância $\Sigma(\theta)$ é o método de Máxima Verossimilhança Restrita - REMV, proposto por Kitanidis (1983), que obtém estimadores menos viciados que os estimadores obtidos por MV. Segundo Schabenberger e Gotway (2005), um estimador de máxima verossimilhança restrito de θ=$(\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3)^T$ é definido como o vetor $\hat{\theta}$ pertencente ao domínio Θ, que maximiza o logaritmo da função de verossimilhança *W = CZ,* em que a matriz *C (n-1)xn* de contrastes linearmente independentes (um contraste é qualquer combinação linear *W = CZ*, tal que E[*CZ*]=*0*. Se $Z \sim N_n(\beta 1, \Sigma(\theta))$, então, $W = CZ \sim N_{n-1}(0, C\Sigma(\theta)C^T)$, assim, o estimador de máxima verossimilhança restrito de θ consiste em maximizar o logaritmo da função de verossimilhança restrita, definida na Equação (37)

$$l(\theta) = -\frac{(n-1)}{2}\log(2\pi) - \frac{1}{2}\log|C\Sigma(\theta)C^T| - \frac{1}{2}W^T (C\Sigma(\theta)C^T)^{-1} W. \quad (37)$$

Para os casos com processos estocásticos não-Gaussianos, Diggle e Ribeiro Jr (2007) sugerem a transformação de dados, utilizando-se a transformação de Box e Cox.

2.5.6 Critérios de seleção de modelos

2.5.6.1 Validação cruzada

A validação cruzada e uma técnica de avaliação de erros de estimativa que permite comparar valores estimados e amostrados, tendo como informação a amostra de dados.

O valor de um elemento amostral, em certa localização, é temporariamente descartado do conjunto de dados da amostra. Um novo valor, nesta mesma localização, é estimado por krigagem, utilizando-se os elementos amostrais restantes. Uma vez que a estimativa é calculada, pode-se compará-la ao valor da amostra que foi inicialmente removida do conjunto de dados amostrais. Este procedimento é repetido para todas as amostras disponíveis e é designado com o método de deixar-um-fora (ISAAKS; SRIVASTAVA, 1989).

Sabendo os valores amostrados e os valores estimados, pode-se conhecer a variância total da estimativa, para avaliar a qualidade ou precisão do processo. Espera-se que os erros de estimação obtidos na Equação 38 tenham média nula, variância constante e distribuição normal de probabilidade (GONÇALVES, 1997).

$$\varepsilon(s_i) = Z(s_i) - \hat{Z}(s_{(i)}). \tag{38}$$

em que $\hat{Z}(s_{(i)})$ é o valor estimado por krigagem sem a *i*-ésima observação, isto é sem $Z(s_i)$.

O erro de estimação não indica somente a eficácia do ajuste dos diferentes modelos teóricos ao semivariograma experimental e a modelagem do processo, mas também a avaliação da estacionaridade e a influência da presença de dados atípicos. A comparação pode ser efetuada por meio do erro médio (*EM*), erro médio reduzido ($\overline{ER}$), desvio padrão dos erros médios (S_{EM}), desvio padrão dos erros reduzidos (S_{ER}) e do erro absoluto (*EA*).

O erro médio é definido na Equação (39):

$$EM = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(Z(s_i) - \hat{Z}(s_{(i)})\right). \tag{39}$$

em que:

n, é o número de dados;

$Z(s_i)$, é valor observado no ponto (s_i);

$\hat{Z}(s_{(i)})$, é o valor predito por krigagem ordinária no ponto (s_i), sem considerar a observação $Z(s_i)$.

O erro médio reduzido é definido por Mcbratney e Webster (1986) e Cressie (1993), conforme a Equação (40):

$$\overline{ER} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{\left(Z(s_i)-\hat{Z}(s_{(i)})\right)}{\sigma(s_{(i)})}\right). \quad (40)$$

em que $\sigma(s_{(i)})$ é o desvio padrão da krigagem no ponto (s_i), sem considerar a observação $Z(s_i)$.

Aplicando-se a condição de não tendenciosidade, o valor populacional para o erro médio reduzido deve ser zero e do desvio padrão do erro reduzido deve ser igual a um. Portanto, o valor de EM e $\overline{ER}$ mais próximo de zero, o valor SEM menor e o valor de SER mais próximo de um são os critérios para escolha do melhor modelo ajustado (MELLO *et al*., 2005: FARACO *et al*., 2008). O erro absoluto é uma medida da magnitude dos erros na unidade da variável. Conhecendo-se o conjunto de valores medidos e predito por krigagem ordinária $Z(s_i)\ e\ \hat{Z}(s_{(i)})$, respectivamente, é possível definir o erro absoluto na unidade da variável estudada, como na Equação (41):

$$EA = \sum_{i=1}^{n}\left|Z(s_i) - \hat{Z}(s_{(i)})\right|. \quad (41)$$

2.5.7 Krigagem

A krigagem é um método geoestatístico que considera as características espaciais de autocorrelação de variáveis regionalizadas, em que deve existir certa continuidade espacial, o que permite que os dados obtidos por amostragem de certos pontos possam ser usados para parametrizar a estimação de pontos cujo valor da variável seja desconhecido.

A krigagem utiliza distâncias ponderadas e estimação por médias móveis, pelas quais os pesos adequados são obtidos a partir de um variograma, representativo da média das diferenças ao quadrado dos valores irregularmente distribuídos de Z_i a intervalos de distâncias especificados (*lags*). É necessário um sistema de equações normais em matrizes, no qual são usados os parâmetros variográficos, para a obtenção dos pesos a serem utilizados para o cálculo do valor do ponto a ser estimado (LANDIM, 2011).

Duas características fazem da krigagem um interpolador *Best Linear Unbiased Estimator* (BLUE) ou *Best Linear Unbiased Predictor* (BLUP) (BURGESS; WEBSTER, 1980), ou seja, seus estimadores não são tendenciosos, pois, em média, a diferença entre valores preditos e observados, para a mesma localização, deve ser nula; possui variância mínima, pois este estimador possui a menor variância dentre todos os estimadores não

tendenciosos. A interpolação por krigagem possibilita conhecer a estrutura de dependência espacial das variáveis regionalizadas em estudo, predizer valores em locais não amostrados e construir mapas temáticos com alta precisão.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 O local da pesquisa

O experimento foi conduzido na chácara denominada Floricultura & Mercado de Plantas Cascavel, região norte da cidade de Cascavel-PR (Figura 3), a 24^{o} 55’ 04” Sul e 53^{o} 28’ 31” Oeste, com altitude de 785 m. O clima da região é temperado, mesotérmico, superúmido, sub-tropical, com temperatura em janeiro de 28,6°C, e em julho de 11,2°C, com ocorrência de geadas, ficando a temperatura 19 ^{o}C, precipitação avaliada em 1940 mm e umidade relativa do ar anual de 75%.

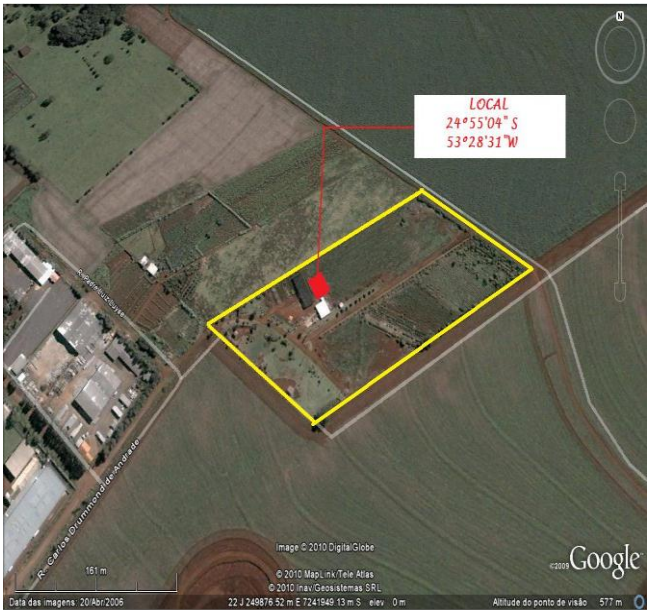

Figura 3 Localização da área experimental.

3.2 Parcelas S1 e S2

Foram demarcadas, conforme a Figura 4, duas parcelas de 10 x 10 m, S1 e S2. Foram instalados: uma bomba de água, aspersores compensantes e não compensantes, bocal azul, super 10, da fabricante NaanDan, coletores marca Fabrimar, manômetros, hidrômetro, válvulas e estação metereológica portátil La Crosse Technology.

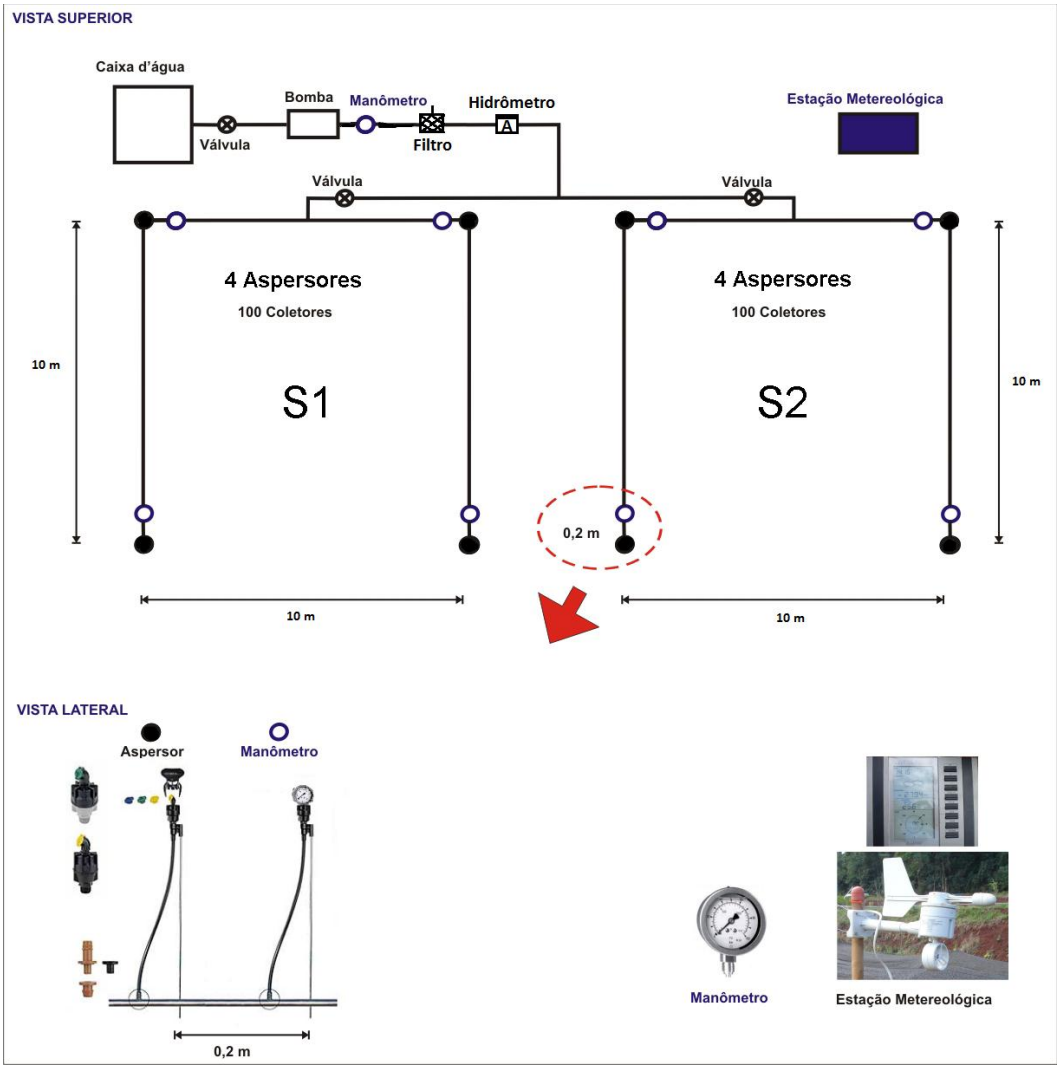

Figura 4 Layout da área e equipamentos que foram utilizados.

Na primeira parcela (S1) foram utilizados 4 aspersores super 10 compensantes, bocal azul, NaanDan, e depois de 32 ensaios foram utilizados 4 aspersores super 10 não compensantes, bocal azul, NaanDan, todos com a altura do aspersor a 1,5 m de altura, 4 manômetros de pressão de 0 a 10 bar e 100 coletores da Fabrimar. A pressão do sistema foi mantida constante a 3,5 bar.

Na segunda subárea (S2), foram utilizados 4 aspersores super 10, compensantes, bocal azul, NaanDan, e depois de 32 ensaios foram utilizados 4 aspersores super 10, não compensantes, bocal azul, NaanDan, todos com a altura do aspersor a 1,0 m de altura, 4 manômetros de pressão de 0 a 10 bar e 100 coletores da Fabrimar. A pressão do sistema foi mantida constante a 3,5 bar.

A temperatura foi obtida por um termômetro, a umidade relativa do ar foi medida por meio de um termohigrógrafo e a velocidade do vento por um anemômetro de conchas totalizador, instalado a 2 m de altura, em relação à superfície do solo. A leitura desse

instrumento foi realizada no início e depois a cada 10 min, durante a realização dos ensaios de 1 hora.

3.3 Grade amostral e disposição dos coletores ou pluviômetros

Conforme a Figura 5, foram instalados: 4 aspersores, 4 manômetros e 100 coletores, conforme a grade amostral, para que fosse coletada 32 vezes e medida a água dos coletores, depois de 1 hora de irrigação, por uma proveta graduada, para se calcular os coeficientes de uniformidade, pelas lâminas de água, medida de cada coletor.

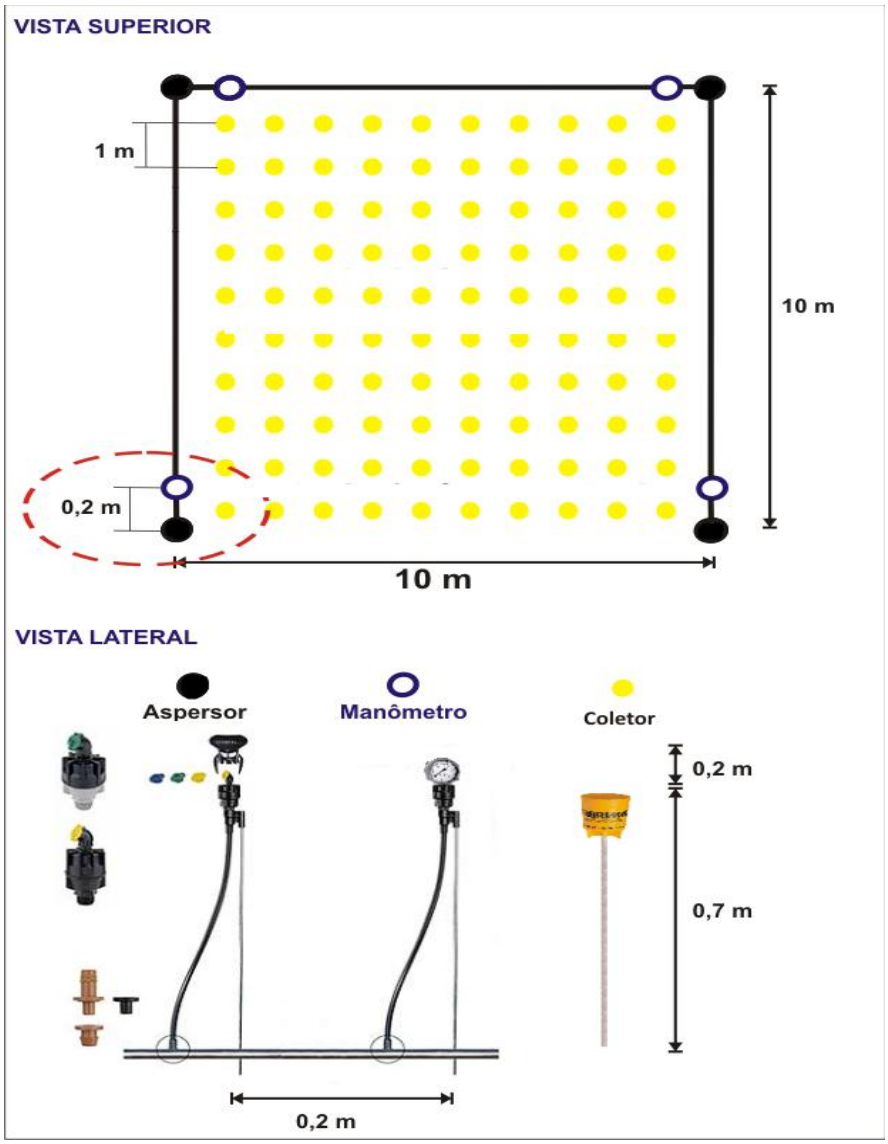

Figura 5 Layout da distribuição dos coletores e aspersores utilizados no experimento.

Para os parâmetros medidos, seguiu-se a norma NBR ISO 7749-2 (ABNT, 2000) - Equipamentos de irrigação agrícola - Aspersores rotativos e Parte 2: Uniformidade de distribuição e métodos de ensaio.

Para a medição da distribuição superficial da água aplicada, a área entre os aspersores foi subdividida de forma que os 100 coletores fossem colocados a distância de 1 m cada, com distribuição homogênea, para receberem parte da água aplicada, caracterizando o sistema de irrigação.

Foram utilizados coletores da Fabrimar com 80 mm de diâmetro e 102 mm de altura, fixados em hastes metálicas, em uma altura de 70 cm da superfície do solo. As hastes e os coletores foram fornecidos pelo fabricante para este tipo de aspersor.

Foi feita a coleta dos dados de água nos 100 coletores para o cálculo da uniformidade de lâmina aplicada, conforme Bernardo (1995).

Apesar de ser um sistema localizado, a microaspersão apresenta características hidráulicas e de operação muito próximas da aspersão convencional. Dessa forma, seguindo Conceição (2002), os mesmos procedimentos utilizados para avaliar os sistemas por aspersão convencional foram utilizados na microaspersão.

Na determinação da uniformidade de um sistema de irrigação por aspersão, foi necessário distribuir vários coletores, de forma equidistante, ao redor do emissor a ser testado, deixando o sistema em funcionamento por um período de uma hora. O tempo ideal para cada teste deve ser igual ou maior do que a metade do tempo que o sistema funcionará por posição, durante as irrigações normais (BERNARDO, 1995).

Os coletores de precipitação seguiram uma disposição quadricular, formando uma malha entre os aspersores a serem testados (Figura 8). As linhas de coletores cobriram uma distância superior ou igual ao alcance do jato dos emissores.

A uniformidade está associada à variabilidade da lâmina de irrigação, ao longo da área molhada, expressa por diferentes índices e coeficientes que foram calculados após a coleta dos dados: Coeficiente de Uniformidade de Christiansen - CUC, Coeficiente de Uniformidade de Distribuição - CUD e Coeficiente de Uniformidade Estatístico - CUE, conforme descrito na Seção 2.3.

A análise geoestatística foi realizada aplicando-se todos os métodos definidos na Seção 2.5, utilizando-se análises univariadas e multivariadas para a construção de mapas temáticos das características hídricas: CUC, CUD e CUE, nos dois tratamentos, aspersores compensantes e não compensantes, nas duas alturas: 1,0 e 1,5 m.

3.4 Análise dos dados

Primeiramente, foi realizada a análise estatística descritiva dos dados para avaliar o comportamento geral de cada variável. Em seguida foram estudadas as cartas de controle das lâminas de água e dos índices CUC, CUD e CUE para identificar a existência ou não de padrões de tendência ou a existência de controle estatístico.

Foi realizada a verificação da existência de tendência direcional espacial por meio do gráfico *postplot* e a verificação da dependência espacial por meio do semivariograma. A seguir, verifica-se a presença de anisotropia, pelos semivariogramas obtidos para as diferentes direções: 0º, 45º, 90º e 135º.

O passo seguinte foi a análise espacial dos dados pela geoestatística, para identificar a estrutura de dependência espacial da função covariância, por meio do ajuste dos modelos teóricos exponencial, esférico, gaussiano e Matérn, com parâmetros estimados por mínimos quadrados e máxima verossimilhança. Nesta etapa, foram aplicados os critérios de validação de modelos para escolha do melhor ajuste e confecção dos mapas temáticos individuais para cada variável em estudo, pela técnica da krigagem.

3.5 *Software* utilizado

Para análise dos dados foi utilizado o *software* Minitab 15 (MINITAB, 2012) e o *software* R (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2011), versão 2.12.2 e módulo geoR (RIBEIRO JR; DIGGLE, 2001).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Análise das variáveis agrometereológicas

Após serem realizados 32 ensaios para cada tratamento (aspersores compensantes e não compensantes com alturas de 1,0 e 1,5 m) e, em cada ensaio, serem realizadas 7 medições de vento, totalizando 224 medições, apresenta-se, a seguir, as estatísticas descritivas da velocidade do vento (V) [m s^{-1}], temperatura do ar (T) [ºC] e umidade do ar (UM) [%].

Observa-se que a velocidade média foi de 2,24 m s^{-1} com alta dispersão (DP = 1,32) e alta heterogeneidade dos dados (CV = 58,93%). Já a temperatura média foi de 25,72 ºC e a umidade do ar média de 47,22%, podendo ser considerados homogêneos (CV < 30%) (GOMES, 2000).

Tabela 1 Análise exploratória das variáveis: velocidade do vento (V), temperatura (T) e umidade do ar (UM), para os aspersores compensantes a 1,0 m de altura

	Variáveis agrometereológicas		
Parâmetros	V (m s^{-1})	T (°C)	UM (%)
Nº de amostras	224	224	224
Média	2,24	25,72	47,22
Mediana	2,39	26,37	48,82
Q1	0,93	20,08	41,11
Q3	3,57	28,90	54,86
DP	1,32	1,06	1,45
Mínimo	0,00	15,20	23,57
Máximo	4,19	39,94	57,14
CV(%)	58,93	4,12	3,07

Notas: Q_1: primeiro quartil; Q_3: terceiro quartil; CV: coeficiente de variação; DP: Desvio padrão.

Na Tabela 2, apresentam-se as estatísticas descritivas da velocidade do vento (V), temperatura (T) e umidade do ar (UM) para os aspersores compensantes a 1,5 m de altura. Observa-se que a velocidade média do vento foi de 2,22 m s^{-1}, semelhante aos dados com o tratamento aspersores compensantes a 1,0 m de altura. Esta medida também tem alta dispersão (DP = 1,06) e alta heterogeneidade nos dados (CV = 47,59%). Observa-se uma baixa na umidade média do ar de 16,42% e uma alta na temperatura média de 30,62 ºC, em

relação aos dados para os aspersores com 1,0 m de altura, mas uma alta dispersão (DP = 4,15), ambos têm homogeneidade dos dados, pois CV < 30%.

Tabela 2 Análise exploratória das variáveis: velocidade do vento (V), temperatura (T) e umidade do ar (UM), para os aspersores compensantes a 1,5 m de altura

	Variáveis		
Parâmetros	V (m s^{-1})	T (°C)	UM (%)
Tamanho da amostra	224	224	224
Média	2,22	30,62	16,42
Mediana	2,20	30,81	16,50
Q1	1,28	27,90	14,98
Q3	2,93	34,43	17,88
DP	1,06	4,15	1,98
Mínimo	0,16	21,09	11,99
Máximo	4,67	38,71	20,63
CV(%)	47,59	13,54	12,05

Notas: Q_1: primeiro quartil; Q_3: terceiro quartil; CV: coeficiente de variação; DP: Desvio padrão.

Nas tabelas 3 e 4, são apresentados os dados da velocidade do vento (V), temperatura (T) e umidade do ar (UM) para os aspersores não compensantes, com altura a 1,0 e 1,5 m de altura. Para os dados coletados com aspersores não compensantes a 1,0 e 1,5 m de altura, respectivamente, observa-se semelhança na velocidade média, com os dados dos aspersores a 1,0 e 1,5 m de altura, com alta dispersão (DP = 1,25 e DP = 1,20) e heterogeneidade dos dados (CV = 61,58% e CV = 56,61%). As temperaturas médias foram de 29,71 e 31,14 ºC, respectivamente. As médias de umidade do ar foram de 47,24 e 46,48%, para os aspersores a 1,0 e 1,5 m de altura, respectivamente. Os dados dessas duas variáveis são considerados homogêneos (CV < 30%).

Tabela 3 Análise exploratória das variáveis: velocidade do vento (V), temperatura (T) e umidade do ar (UM), para os aspersores não compensantes a 1,0 m de altura

	Variáveis		
Parâmetros	V (m s^{-1})	T (°C)	UM (%)
Tamanho da amostra	224	224	224
Média	2,03	29,71	47,24
Mediana	2,05	29,19	50,61
Q1	0,93	26,63	39,46
Q3	2,92	33,33	55,62
DP	1,25	5,00	9,81
Mínimo	0,00	18,29	23,57
Máximo	4,61	39,94	57,29
CV(%)	61,58	16,82	20,77

Notas: Q_1: primeiro quartil; Q_3: terceiro quartil; CV: coeficiente de variação; DP: Desvio padrão.

Tabela 4 Análise exploratória das variáveis: velocidade do vento (V), temperatura (T) e umidade do ar (UM), para os aspersores não compensantes a 1,5 m de altura

	Variáveis		
Parâmetros	V (m s^{-1})	T (°C)	UM (%)
Tamanho da amostra	224	224	224
Média	2,23	31,14	46,48
Mediana	2,20	30,84	47,50
Q1	1,18	28,90	39,32
Q3	2,94	34,49	55,21
DP	1,20	3,78	1,51
Mínimo	0,00	21,09	29,00
Máximo	4,67	38,71	57,86
CV(%)	56,61	12,13	3,25

Notas: Q_1: primeiro quartil; Q_3: terceiro quartil; CV: coeficiente de variação; DP: Desvio padrão.

De forma uma geral, considerando-se as tabelas 1 a 4, pode-se dizer, com relação a variável velocidade do vento (V), que foi constatada uma grande variação durante todos os 32 ensaios por tratamento, pois se teve velocidade do vento miníma de 0 m s^{-1} e máximo de 4,19 m s^{-1}. A velocidade média do vento no experimento foi de 2,18 m s^{-1}, com alta heterogeneidade dos dados. A temperatura (T) apresentou um mínimo de 15,20 ºC e máximo de 39,94 ºC. A Temperatura média do experimento foi de 29,29 ºC, com alta heterogeneidade dos dados. A umidade do ar (UM) no experimento apresentou um mínimo de 11,99% e máximo de 57,29%. A umidade média do ar foi de 39,34%, com uma baixa umidade dos dados no experimento, quando se trabalhou com aspersores compensantes na altura de 1,5 m.

4.2 Análise das variáveis das lâminas médias de água de irrigação por aspersão dos 100 coletores nos 32 ensaios

Na Tabela 5, são apresentadas as estatísticas descritivas das lâminas de água de aspersor compensante a 1,0 m de altura (LMC1,0 m), lâmina de água de aspersor compensante a 1,5 m de altura (LMC1,5 m), lâmina de água de aspersor não compensante a 1,0 m de altura (LMNC1,0 m) e lâmina de água de aspersor não compensante a 1,5 m de altura (LMNC1,5 m). Observa-se alguma semelhança nos valores médios, com pouca dispersão dos dados (DP baixos) e homogeneidade dos dados, em relação a suas médias (CV < 30%). Segundo as análises dos gráficos *box-plot*, não existem pontos discrepantes.

Tabela 5 Análise exploratória das variáveis: lâmina de água de irrigação média por aspersão dos aspersores compensantes e não compensantes a 1,0 e 1,5 m de altura

Variáveis	LMC1,0 m	LMC1,5 m	LMNC1,0 m	LMNC1,5 m
Tamanho Amostra	3200	3200	3200	3200
Média	3,30	2,96	3,68	3,36
DP	0,29	0,28	0,31	0,39
Variância	0,08	0,08	0,09	0,15
CV%	8,81	9,45	8,29	11,7
Min	2,84	2,49	2,71	2,22
Q1	3,04	2,80	3,51	3,05
Mediana	3,29	2,93	3,67	3,38
Q3	3,59	3,06	3,84	3,70
Max	3,74	3,80	4,47	4,06
Coef. Assimetria	0,06	1,03	0	-0,3
Coef. Curtose	-1,31	1,56	0,49	-0,53

Notas: Q_1: primeiro quartil; Q_3: terceiro quartil; CV: coeficiente de variação; DP: Desvio padrão; LMC1,0 m: lâminas médias de água de aspersores compensantes a 1,0 m de altura; LMC1,5 m: lâminas médias de água de aspersores compensantes a 1,5 m de altura; LMNC1,0 m: lâminas médias de água de aspersores não compensantes a 1,0 m de altura; LMNC1,5 m: lâminas médias de água de aspersores não compensantes a 1,5 m de altura.

4.2.1 Cartas de controle das lâminas médias de água de irrigação por aspersão dos 100 coletores nos 32 ensaios realizados

Nas figuras 6 e 7, são apresentadas as cartas de controle Média e Desvio Padrão (S), com limites de controle 3-sigma, para as lâminas médias de água dos 100 coletores na irrigação, com o uso dos aspersores compensantes a 1,0 e 1,5 m de altura, respectivamente. Observam-se pontos fora dos limites de controle (3-sigma), pois há grande evidência de que tenha ocorrido alteração no nível médio do processo. Existem sequências de seis pontos consecutivos abaixo da linha central do gráfico S, o que pode sugerir a ocorrência de alteração no valor médio do processo, o que de fato aconteceu. Também se observam tendências cicloidais no gráfico da média o que evidencia o uso da análise espacial dos dados.

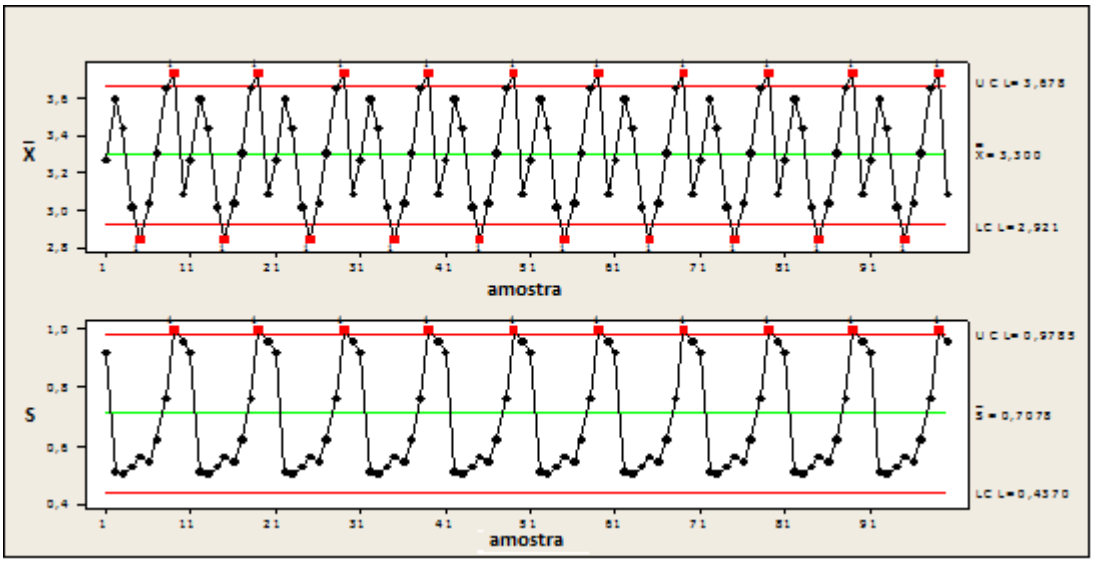

Figura 6 Carta de controle da média e desvio padrão (S), para as lâminas de água de irrigação por aspersão dos 100 coletores, com aspersores compensantes a 1,0 m de altura.

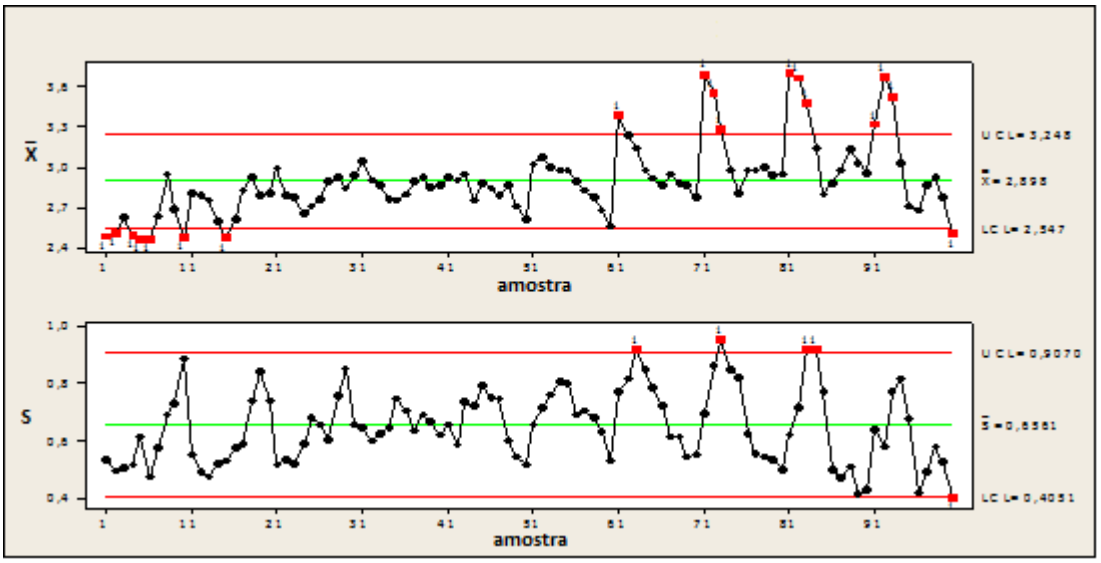

Figura 7 Carta de controle da média e desvio padrão (S), para lâminas de água de irrigação por aspersão dos 100 coletores, com aspersores compensantes a 1,5 m de altura.

Nas figuras 8 e 9 são apresentadas as cartas de controle Média e Desvio Padrão (S), com limites de controle 3-sigma, para as lâminas médias de água dos 100 coletores na irrigação, com o uso dos aspersores não compensantes a 1,0 m e 1,5 m de altura, respectivamente. Observam-se, também, pontos fora dos limites de controle (3-sigma) e a existência de sequências de pontos consecutivos, acima e abaixo das linhas centrais, o que sugere a ocorrência de alteração no valor médio do processo e tendências cicloidais.

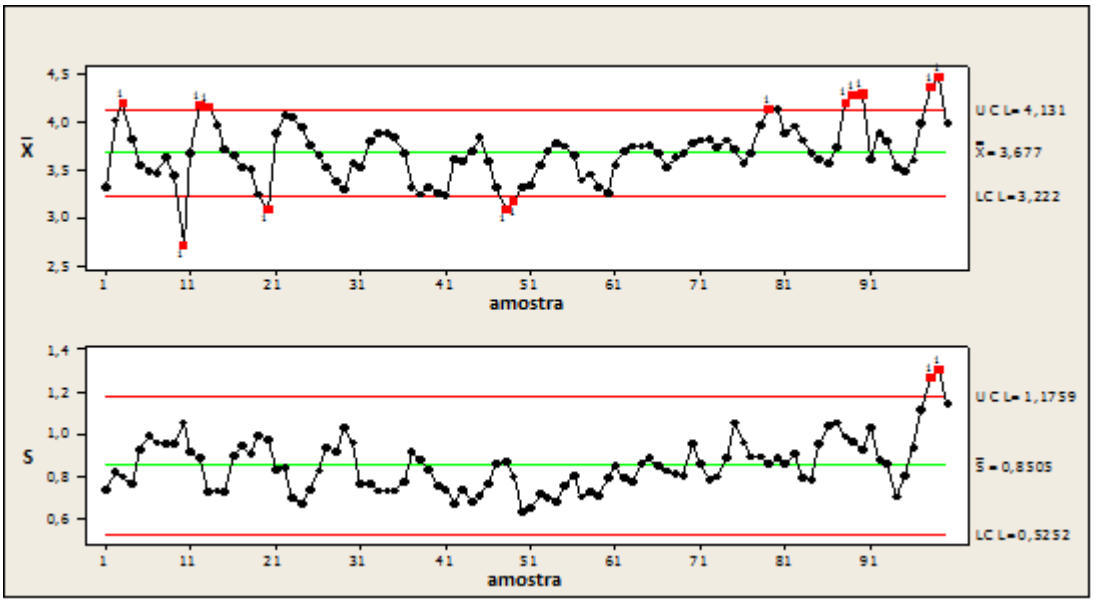

Figura 8 Carta de controle da média e desvio padrão (S), para as lâminas de água de irrigação por aspersão dos 100 coletores, com aspersores não compensantes a 1,0 m de altura.

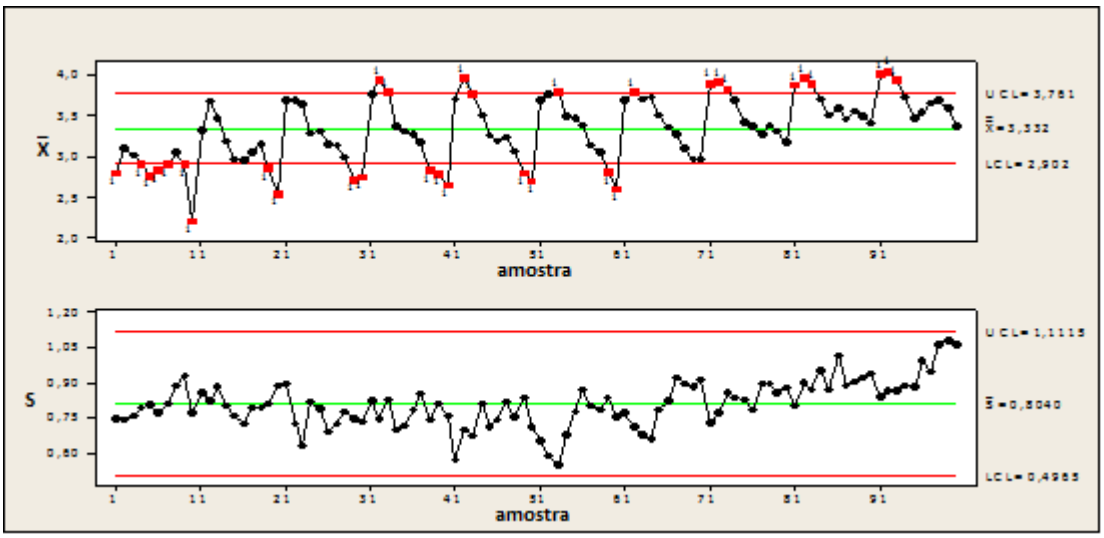

Figura 9 Carta de controle da média e desvio padrão (S), para as lâminas de água de irrigação por aspersão dos 100 coletores, com aspersores não compensantes a 1,5m de altura.

4.2.2 Análise espacial das lâminas médias de água de irrigação por aspersão dos 100 coletores, com uso de aspersores compensantes e não compensantes a 1,0 e 1,5 m de altura

Nesta seção, apresentam-se as as análises espaciais das lâminas médias de água dos 100 coletores na irrigação por aspersão, com o uso de aspersores nas alturas de 1,0 e 1,5 m, totalizando quatro variáveis em estudo (LMC1,0 m - lâminas médias de água dos

coletores na irrigação, com o uso dos aspersores compensantes a 1,0 m de altura; LMC1,5 m - lâminas médias de água dos coletores na irrigação, com o uso dos aspersores compensantes a 1,5 m de altura; LMNC1,0 m - lâminas médias de água dos coletores na irrigação, com o uso dos aspersores não compensantes a 1,0 m de altura e LMNC1,5 m - lâminas de água dos coletores na irrigação, com o uso dos aspersores não compensantes a 1,5 m de altura.

Na Tabela 6, é apresentado o ajuste dos modelos espaciais, utilizando-se a análise geoestatística para as variáveis LMC1,0 m, LMC1,5 m, LMNC1,0 m e LMNC1,5 m. Foram ajustados vários modelos teóricos, tais como: esférico, exponencial, gaussiano e a família Matérn, com diferentes parâmetros de forma K, com parâmetros estimados pelos métodos de mínimos quadrados ordinários (OLS), mínimos quadrados ponderados (WLS1) e máxima verossimilhança (MV), dos quais, pelos critérios de validação cruzada (FARACO *et al*., 2008), foram escolhidos e apresentados os modelos que melhor se ajustaram as semivariâncias experimentais, para cada variável. Observa-se que, em todas as variáveis o modelo gaussiano foi o selecionado pelo critério da validação cruzada. Observa-se que há pouca diferença entre os valores dos parâmetros estimados do efeito pepita φ_1 e do patamar $C=\varphi_1+\varphi_2$, nas lâminas de água dos coletores na irrigação por aspersores compensantes e não compensantes a 1,0 m e 1,5 m de altura. Existem diferenças no raio de dependência espacial nas quatro variáveis (alcance), variando de 1,54 m a 7,64 m. Segundo o coeficiente de efeito pepita relativo E(%), existe alta dependência espacial nas variáveis LMC1,0 m, LMC1,5 m e LMNC1,5 m (E < 25%) e existe moderada dependência espacial na LMNC1,0 m (25% < E < 75%) (CAMBARDELLA *et al*., 1994).

Tabela 6 Parâmetros e modelos de semivariogramas ajustados, para as variáveis lâminas de água de irrigação por aspersão, com aspersores compensantes e não compensantes a 1,0 e 1,5 m de altura.

Variáveis	Modelo	Métodos de estimação	$\hat{\varphi}_1$	C= $\hat{\varphi}_1 + \hat{\varphi}_2$	â (m)	E (%)
LMC1,0 m	Gaussiano	OLS	0,01	0,09	1,54	12,60%
LMC1,5 m	Gaussiano	OLS	0,02	0,09	5,00	17,84%
LMNC1,0 m	Gaussiano	OLS	0,03	0,10	5,00	35,67%
LMNC1,5 m	Gaussiano	WLS1	0,02	0,30	7,64	7,97%

Notas: $\hat{\varphi}_1$: efeito pepita; C= $\hat{\varphi}_1 + \hat{\varphi}_2$ patamar; â: estimativa alcance; E = $\hat{\varphi}_1 / \hat{\varphi}_1 + \hat{\varphi}_2$ x100: efeito pepita relativo; LMC1,0 m: lâminas médias de água de aspersores compensantes a 1,0 m de altura; LMC1,5 m: lâminas médias de água de aspersores compensantes a 1,5 m de altura; LMNC1,0 m: lâminas médias de água de aspersores não compensantes a 1,0 m de altura; LMNC1,5 m: lâminas médias de água de aspersores não compensantes a 1,5 m de altura; OLS: método de mínimos quadrados; WLS1: método de mínimos quadrados ponderados.

No estudo da variabilidade espacial das quatro variáveis, utilizando-se os semivariogramas experimentais, observa-se que as variáveis LMC1,5 m, LMNC1,0 m e

LMNC1,5 m apresentam, em cada caso, similaridade dos semivariogramas nas direções 0º, 45º, 90º e 135º, consequentemente, assume-se que a distribuição dos dados para cada variável é isotrópica (SOUZA *et al*., 1999; GUEDES *et al*., 2008), isto é, não existe uma direção privilegiada no estudo da variabilidade espacial.

Os gráficos dos semivariogramas apresentados nas figuras 10, 12, 14 e 16, assim como os gráficos envelopes das semivariâncias apresentados nas figuras 11, 13, 15 e 17 (calculados, tomando-se, em cada intervalo, os valores máximos e mínimos dos semivariogramas), demonstram a presença de continuidade e variabilidade espacial nas variáveis em estudo: LMC1,0 m, LMC1,5 m, LMNC1,0 m e LMNC1,5 m.

Na Figura 10, são apresentados o semivariograma experimental e o modelo ajustado gaussiano por OLS para LMC1,0 m. Este modelo ajustado teve um alcance estimado de 1,54 m, que é o raio de dependência espacial entre observações.

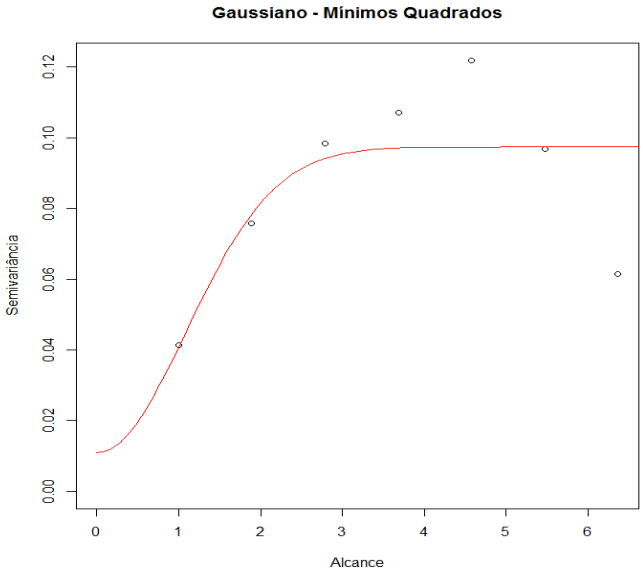

Figura 10 Semivariograma experimental e modelo ajustado da LMC1,0 m pelo modelo gaussiano.

Na Figura 11, apresenta-se o gráfico de envelope das semivariâncias da LMC1,0 m. Observam-se dois pontos perto do limite inferior do envelope, mostrando a continuidade espacial.

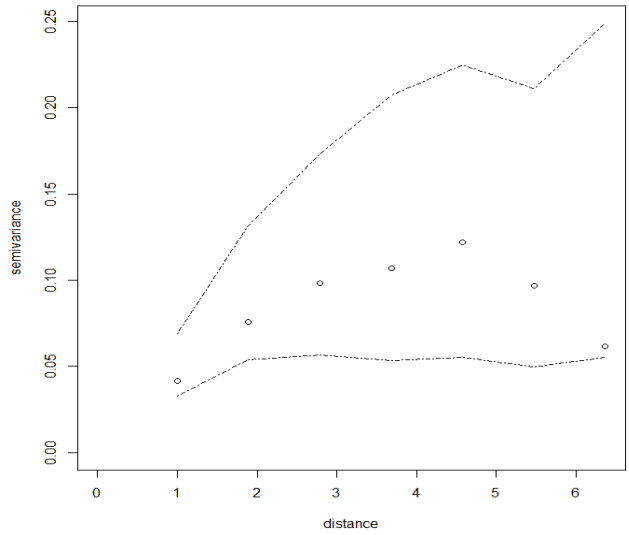

Figura 11 Envelope da semivariância da LMC1,0 m.

Na Figura 12 são apresentados o semivariograma experimental e o modelo ajustado gaussiano por OLS, para LMC1,5 m. Este modelo ajustado teve um alcance estimado de 5,00 m, que é o raio de dependência espacial entre observações, superior ao obtido na Figura 10, para a LMC1,0 m.

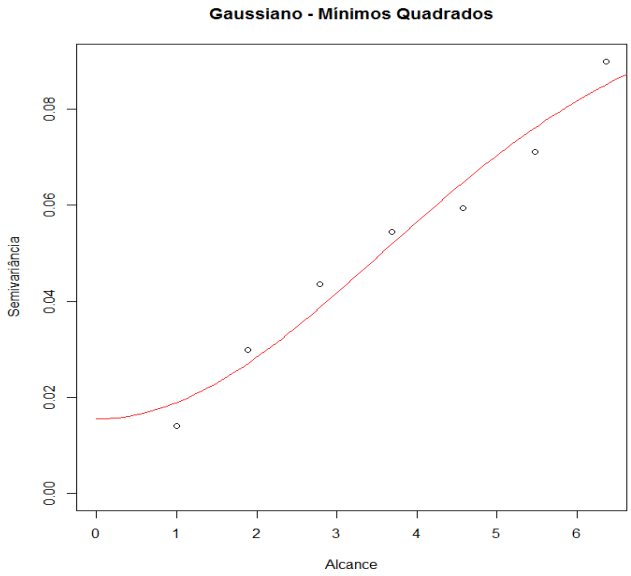

Figura 12 Semivariograma experimental e modelo ajustado da LMC1,5 m pelo modelo gaussiano.

Na Figura 13, apresenta-se o gráfico de envelope para o estudo da continuidade espacial da semivariância da LMC1,5 m. Observa-se um ponto perto do limite inferior do envelope, mostrando a existência de continuidade espacial.

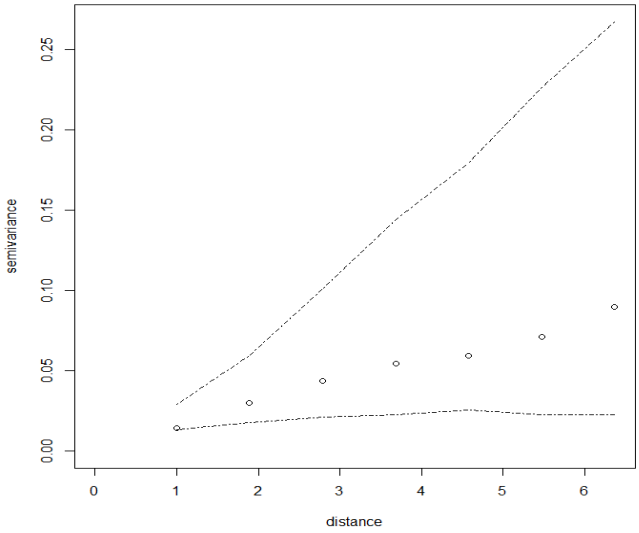

Figura 13 Envelope da semivariância da LMC1,5 m.

Na Figura 14, são apresentados o semivariograma experimental e o modelo ajustado por OLS, para a LMNC1,0 m. O modelo gaussiano ajustado teve um raio de dependência espacial entre observações (alcance) também de 5,00 m, similar ao obtido quando se trabalhou com a LMC1,5 m.

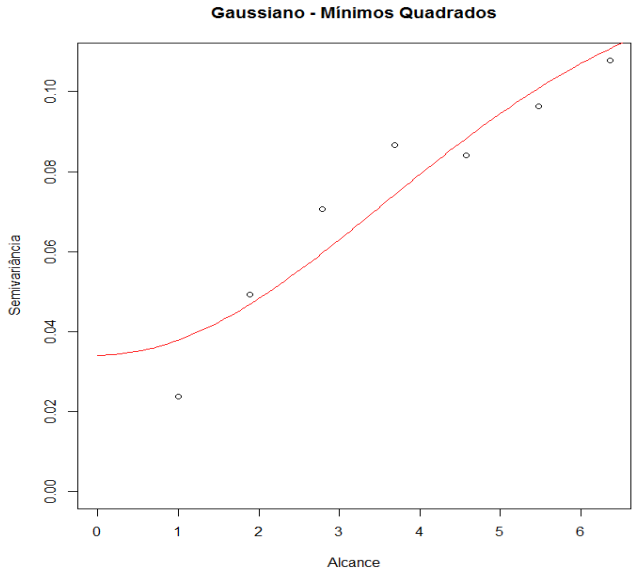

Figura 14 Semivariograma experimental e modelo ajustado da LMNC1,0 m pelo modelo gaussiano.

Na Figura 15, é apresentado o gráfico de envelope para a semivariância da LMNC1,0 m. Observa-se um ponto fora do envelope, o que mostra a existência de continuidade espacial e variabilidade espacial.

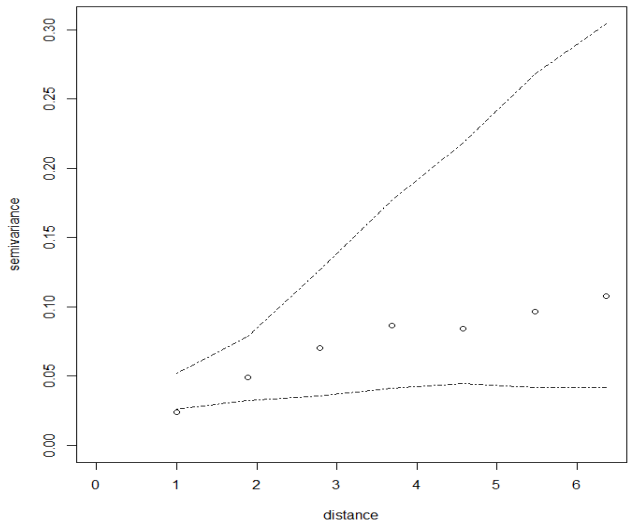

Figura 15 Envelope das semivariâncias da LMNC1,0 m.

Na Figura 16, apresentam-se o semivariograma experimental e o modelo ajustado por WLS1 da LMNC1,5 m. Observa-se que o modelo ajustado também foi o gaussiano com um raio de dependência espacial estimado de 7,64 m, maior que as da LMC1,0 m, LMC1,5 m e LMNC1,0 m.

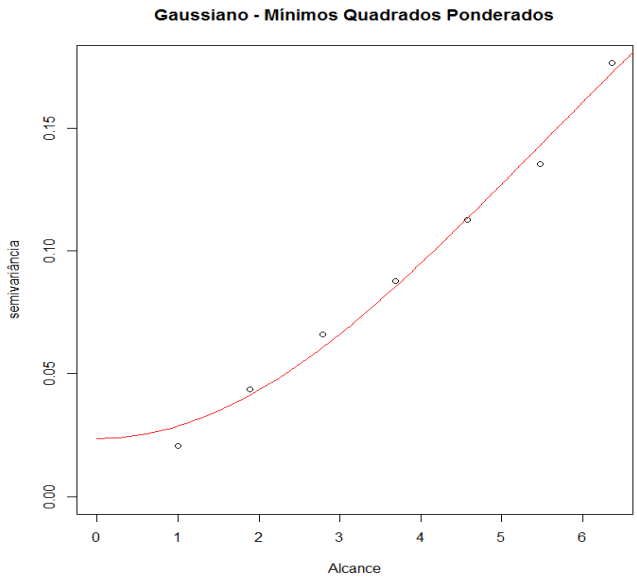

Figura 16 Semivariograma experimental e modelo ajustado da LMNC1,5 m pelo modelo gaussiano.

Na Figura 17, apresenta-se o gráfico de envelope para a LMNC1,5 m. Igual aos casos anteriores, esta variável apresenta continuidade espacial e variabilidade espacial entre os dados.

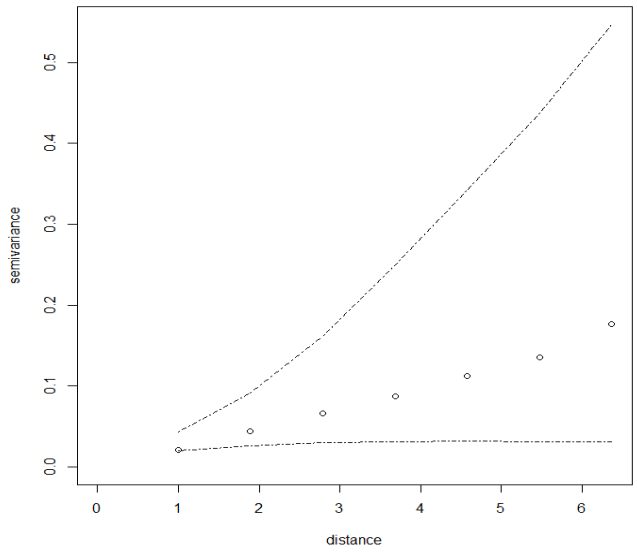

Figura 17 Envelope das semivariâncias da LMNC1,5 m.

4.2.2.1 Mapas temáticos das lâminas médias de água de irrigação por aspersão dos 100 coletores com aspersores compensantes e não compensantes a 1,0 e 1,5 m de altura

Foram construídos os mapas temáticos para as quatro variáveis em estudo: LMC1,0 m, LMC1,5 m, LMNC1,0 m e LMNC1,5 m, por meio da técnica da krigagem ordinária, que leva em consideração as características espaciais do modelo escolhido e estimativas dos parâmetros φ_1, φ_2 e φ_3, em cada caso (Figuras 18 a 21). Verificam-se setores com maiores e menores níveis de água, nos mapas temáticos confeccionados para cada lâmina de água dos coletores, na irrigação com aspersores compensantes e não compensantes a 1,0 m e 1,5 m de altura. Verificam-se diferenças entre os mapas LMC1,0 m e LMNC1,0 m, assim como LMC1,5 m e LMNC1,5 m.

Verificando-se os quatro mapas das lâminas médias de água, na irrigação dos 32 ensaios realizados com os aspersores compensantes e não compensantes, pode-se notar que, nos aspersores compensantes a 1,0 m de altura (Figura 18), ocorreu uma grande homogeneidade, comprovado quando se observam os coeficientes de variação (CV = 8,29%), que foram os menores que os dos outros três procedimentos propostos: LMC1,5 m (CV = 11,7%, LMNC1,0 m (CV = 8,81%) e LMNC1,5 m (CV = 9,45%).

Na Figura 18, observa-se que as menores lâminas de água ficaram no centro e foram aumentando para uma das bordas. Isso aponta uma uniformidade localizada e, também, que houve uma grande área onde a quantidade de água foi na menor faixa da escala, fazendo que a média encontrada para lâmina de água, com uso dos aspersores compensantes a 1,0 m de altura (LMC1,0 m), fosse de 3,30 mm.

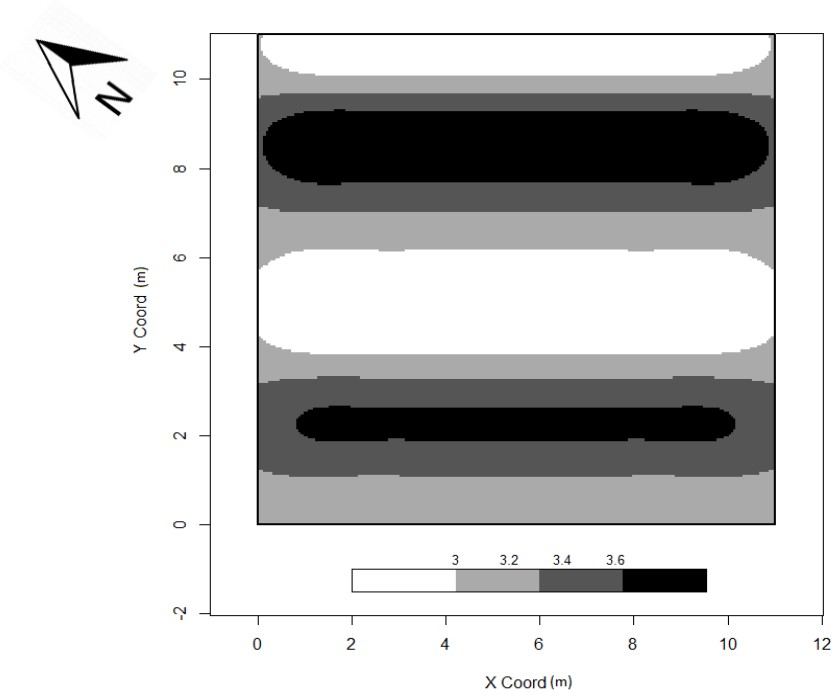

Figura 18 Mapa temático da lâmina média de água de irrigação por aspersão, com aspersores compensantes a 1,0 m de altura (LMC1,0 m).

Na Figura 19, observa-se que a média das lâminas de água teve uma melhor distribuição do que a anterior, na qual, também, não teve nenhum ponto com a menor faixa determinada e foi mais uniforme, mas a região de maior lâmina ficou concentrada em uma das bordas e pequena. Pode-se comprovar este fato, verificando-se na Tabela 5 que isto é verdadeiro, porque a média da lâmina de água, com o uso de aspersores não compensantes a 1,0 m de altura (LMCNC1,0 m) foi 3,68 mm, maior que todos os outros.

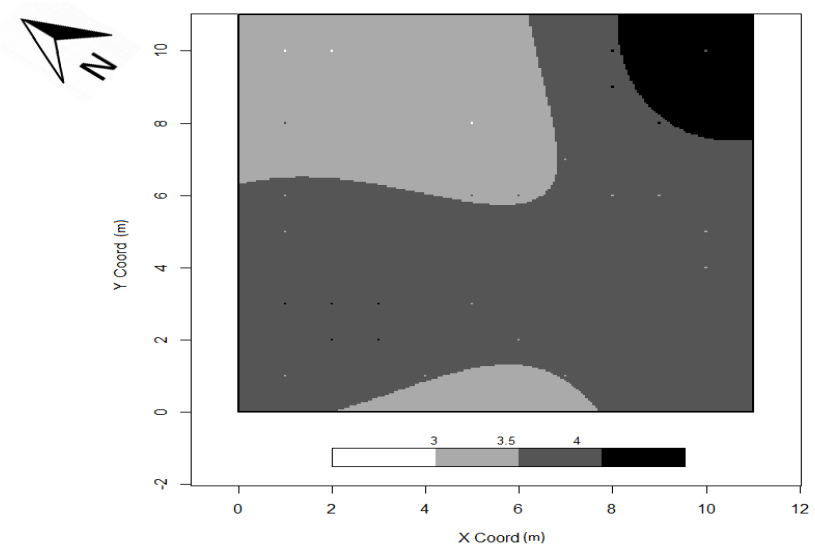

Figura 19 Mapa temático da lâmina média de água de irrigação por aspersão, com aspersores não compensantes a 1,0 m de altura (LMNC1,0 m).

Na Figura 20, observa-se uma uniformidade de distribuição das lâminas médias de água, nas quais as maiores lâminas também ficaram em uma das bordas, mas contrária a da figura anterior. Também se pode verificar que as duas maiores áreas são correspondentes aos menores valores da escala cuja média calculada das lâminas médias de água, com aspersores compensantes a 1,5 m de altura (LMC1,5 m) foi de 2,96 mm, menor que todas as outras.

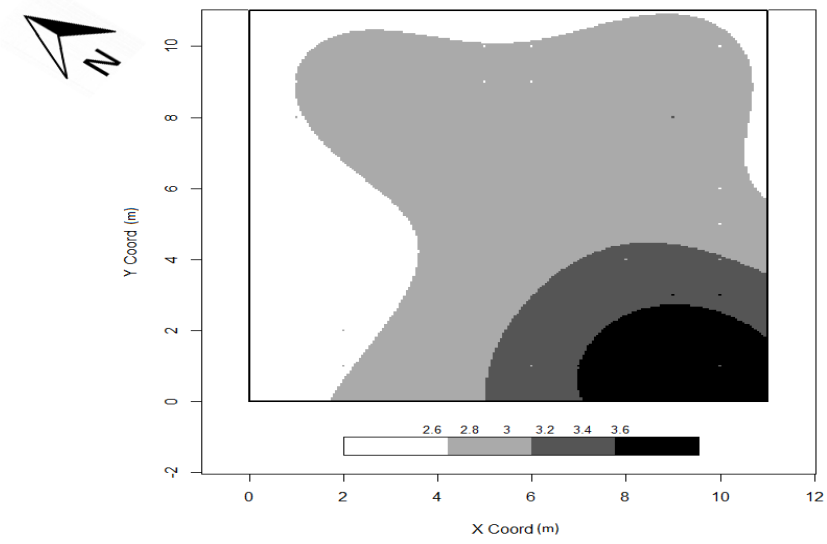

Figura 20 Mapa temático da lâmina média de água de irrigação por aspersão, com aspersores compensantes a 1,5 m de altura (LMC1,5 m).

Na Figura 21, observa-se a melhor distribuição das lâminas médias de água, onde também as maiores lâminas ficaram em uma das bordas, mas em maior número que as anteriores e uma parcela mínima de lâminas na primeira escala, de até 2,5 mm e contrária à borda das maiores.

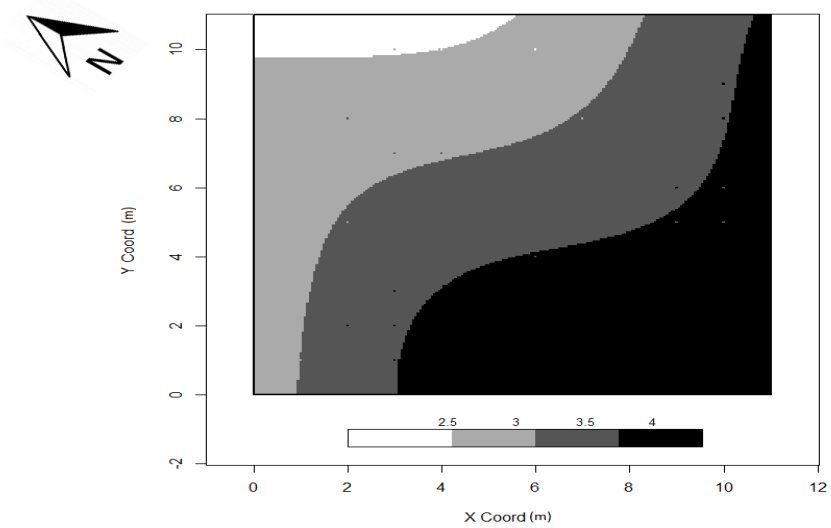

Figura 21 Mapa temático da lâmina média de água de irrigação por aspersão, com aspersores não compensantes a 1,5 m de altura (LMNC1,5 m).

4.3 Análise estatística das variáveis CUC, CUD e CUE das lâminas médias de água de irrigação por aspersão dos 100 coletores

Nesta seção, são apresentadas as análises estatísticas de controle de processo e espacial dos coeficientes de uniformidade de Christiansen, com aspersores compensantes a 1,0 e 1,5 m de altura (CUCC1,0 m e CUCC1,5 m, respectivamente), dos coeficientes de distribuição com aspersores compensantes a 1,0 e 1,5 m de altura (CUDC1,0 m e CUDC1,5 m, respectivamente) e coeficientes estatísticos de uniformidade com aspersores compensantes a 1,0 e 1,5 m, (CUEC1,0 m e CUEC1,5 m, respectivamente). Também são apresentados os coeficientes CUC, CUD e CUE com aspersores não compensantes a 1,0 e 1,5 m de altura (CUCNC1,0 m, CUCNC1,5 m, CUDNC1,0 m, CUDNC1,5 m, CUENC1,0 m e CUENC1,5 m, respectivamente).

Nas tabelas 7 e 8, são apresentadas as estatísticas descritivas, em que foram calculados: média, desvio-padrão, coeficiente de variação, 1º quartil, 3º quartil, mediana, variância, coeficiente assimetria, coeficiente curtose e valores de máximo e mínimo para o CUC, CUD e CUE, com a utilização dos aspersores compensantes e não compensantes a

1,0 m e 1,5 m de altura. Ao longo do experimento, os valores máximos de CUC foram: CUCC1,0 m = 88,35%, CUCC1,5 m = 89,50%, CUCNC1,0 m = 87,63% e CUCNC1,5 m = 88,22%; valores mínimos de CUC foram: CUCC1,0 m = 75,98%, CUCC1,5 m = 73,80%, CUCNC1,0 m = 70,45% e CUCNC1,5 m = 73,55%.

Na Tabela 7, observa-se que os valores médios dos CUCC1,0 m e CUCC1,5 m estão acima de 82%, considerados uma uniformidade média do CUC, os valores médios do CUD variam de 74,52 a 75,05%, considerados também uma uniformidade média e, finalmente, os valores do CUE variam de 79,14 a 79,60%, considerados uma uniformidade alta (ZOCOLER, 2005). Todas as variáveis em estudo apresentaram homogeneidade nos dados (CV < 30%) e baixa dispersão.

Tabela 7 Resumo das análises das variáveis: CUC, CUD e CUE das lâminas médias de água de irrigação por aspersão, dos 100 coletores ou pluviômetros compensantes a 1,0 e 1,5 m de altura

Variáveis	CUCC1,0 m	CUDC1,0 m	CUEC1,0 mm	CUCC1,5 m	CUDC1.5 m	CUEC1.5 m
Tamanho da Amostra	3200	3200	3200	3200	3200	3200
Média	82,87	75,05	79,14	83,82	74,52	79,60
DP	4,18	5,74	5,48	3,32	4,30	3,65
Variância	17,49	32,92	30,04	11,01	18,47	13,33
CV %	5,05	7,64	6,93	3,96	5,77	4,59
Min	75,98	67,34	69,09	73,80	64,91	65,15
Q1	77,72	68,00	73,38	81,88	71,59	77,30
Mediana	83,72	75,60	80,79	84,24	75,42	79,95
Q3	86,41	80,08	82,50	86,16	77,67	82,21
Max	88,35	84,65	85,95	89,50	83,00	86,51
Coef. Assimetria	-0,41	0,00	-0,59	-0,67	-0,35	-0,81
Coef. Curtose	-1,28	-1,15	-0,97	0,00	-0,57	1,30

Notas: Q_1: primeiro quartil; Q_3: terceiro quartil; CV: coeficiente de variação; DP: Desvio padrão; CUCC1,0 m: Coeficiente de Uniformidade de Christiansen com aspersor compensante a 1,0 m de altura; CUDC1,0 m: Coeficiente de Uniformidade de Distribuição com aspersor compensante a 1,0 m de altura; CUEC1,0 m: Coeficiente Estatístico de Uniformidade com aspersor compensante a 1,0 m de altura; CUCC1,5 m: Coeficiente de Uniformidade de Christiansen com aspersor compensante a 1,5 m de altura; CUDC1,5 m: Coeficiente de Uniformidade de Distribuição com aspersor compensante a 1,5 m de altura; CUEC1,5 m: Coeficiente Estatístico de Uniformidade com aspersor compensante a 1,5 m de altura.

Observa-se, na Tabela 8, que os valores médios do CUCNC1,0 m e CUCNC1,5 m estão acima de 81%, considerados de uniformidade média (MANTOVANI; BERNARDO; PALARETTI, 2007). Os valores médios de CUDNC1,0 m e CUDNC1,5 m são 71,60 e 72,23%, respectivamente, considerados de uniformidade média e, finalmente, os valores do CUENC1,0 m e CUENC1,5 m são 75,59 e 76,80%, respectivamente, também, segundo Mantovani, Bernardo e Palaretti (2007), são considerados de uniformidade média.

Tabela 8 Resumo das análises das variáveis independentes: CUC, CUD e CUE das lâminas médias de água de irrigação por aspersão, dos 100 coletores não compensantes a 1,0 e 1,5 m de altura

Variáveis	CUCNC1m	CUDNC1m	CUENC1m	CUCNC1,5m	CUDNC1,5m	CUENC1,5m
Tamanho Amostra	3200	3200	3200	3200	3200	3200
Média	81,08	71,60	76,80	81,24	72,23	75,59
DP	3,21	4,77	3,83	3,13	5,00	3,87
Variância	10,29	22,73	14,68	9,79	25,00	15,00
CV %	3,96	6,66	4,99	3,85	6,92	5,12
Min	70,45	57,14	61,25	73,55	62,28	66,19
Q1	79,36	68,91	73,95	79,16	68,52	72,78
Mediana	81,73	72,18	77,59	81,30	72,05	75,59
Q3	83,02	75,20	79,49	83,60	75,52	78,19
Max	87,63	80,42	83,05	88,22	93,89	84,64
Coef. Assimetria	-0,52	-0,58	-0,91	-0,30	0,70	0,06
Coef. Curtose	0,23	0,11	1,45	-0,02	2,18	-0,17

Notas: Q_1: primeiro quartil; Q_3: terceiro quartil; CV: coeficiente de variação; DP: Desvio padrão; CUCNC1,0 m: Coeficiente de Uniformidade de Christiansen com aspersor não compensante a 1,0 m de altura; CUDNC1,0 m: Coeficiente de Uniformidade de Distribuição com aspersor não compensante a 1,0 m de altura; CUENC1,0 m: Coeficiente Estatístico de Uniformidade com aspersor não compensante a 1,0 m de altura; CUCNC1,5 m: Coeficiente de Uniformidade de Christiansen com aspersor não compensante a 1,5 m de altura; CUDNC1,5 m: Coeficiente de Uniformidade de Distribuição com aspersor não compensante a 1,5 m de altura; CUENC1,5 m: Coeficiente Estatístico de Uniformidade com aspersor não compensante a 1,5 m de altura

4.3.1 Cartas de controle das variáveis CUC, CUD e CUE das lâminas médias de água de irrigação por aspersão dos 100 coletores

Todas as cartas de controle, apresentandas nas figuras 22 a 33, mostram processos fora de controle estatístico, com tendências cicloidais dos CUC, CUD e CUE, com aspersores compensantes e não compensantes a 1,0 e 1,5 m de altura. Este fato se deve à autocorrelação espacial dos dados georeferenciados, por este motivo é importante o estudo de uma análise espacial utilizando os métodos da geoestatística.

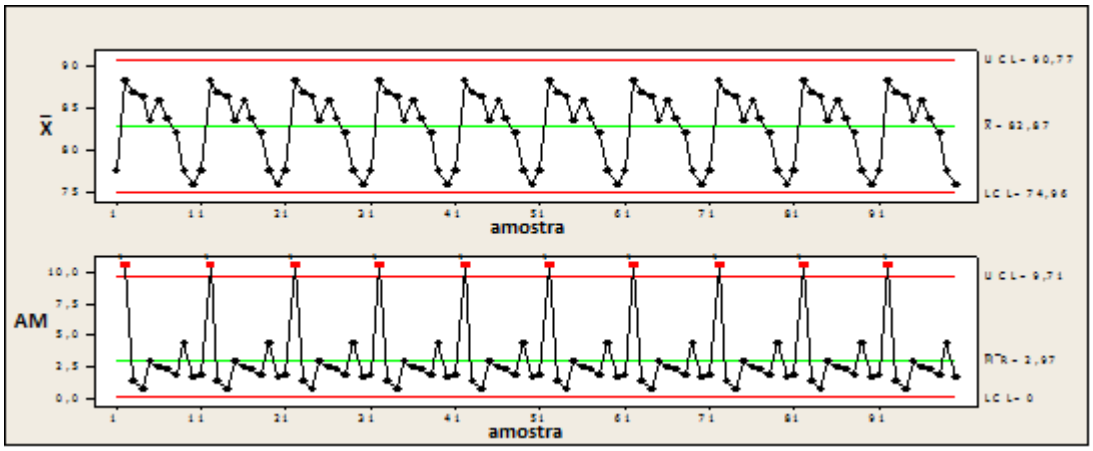

Figura 22 Carta de controle da média individual e AM (amplitude móvel), para o CUC dos 100 coletores, com aspersores compensantes a 1,0 m de altura (CUCC1,0 m).

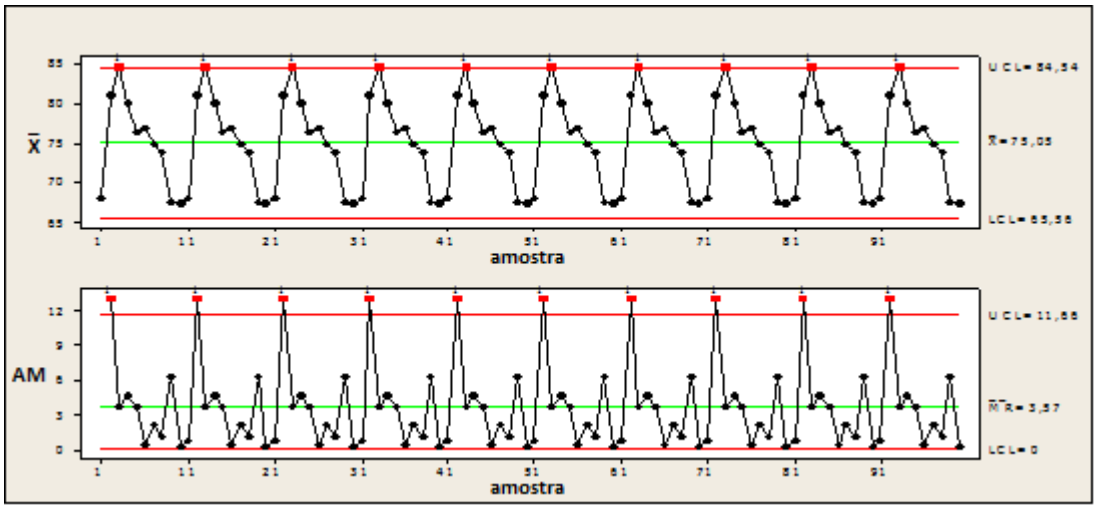

Figura 23 Carta de controle da média individual e AM (amplitude móvel), para o CUD dos 100 coletores, com aspersores compensantes a 1,0 m de altura (CUDC1,0 m),

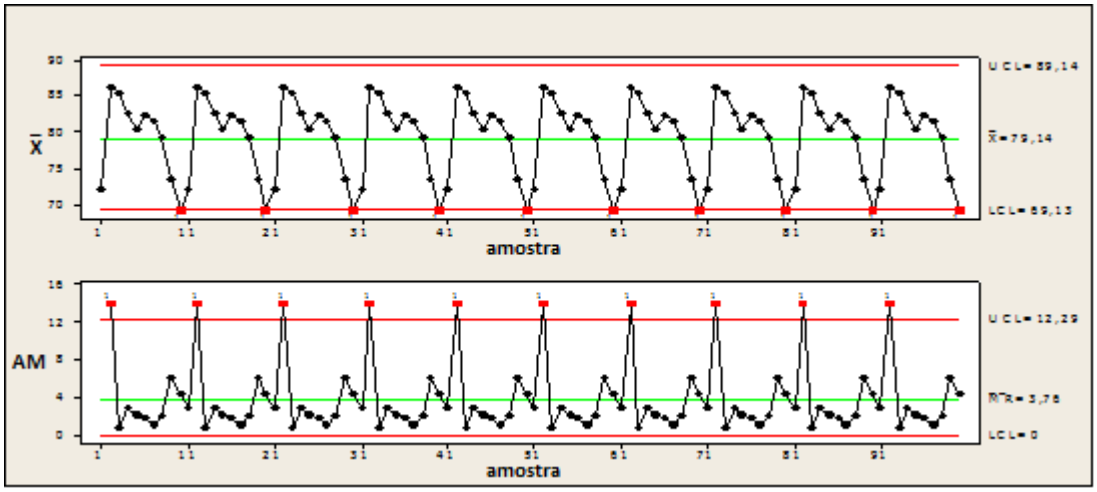

Figura 24 Carta de controle da média individual e AM (amplitude móvel), para o CUE dos 100 coletores, com aspersores compensantes a 1,0 m de altura (CUEC1,0 m).

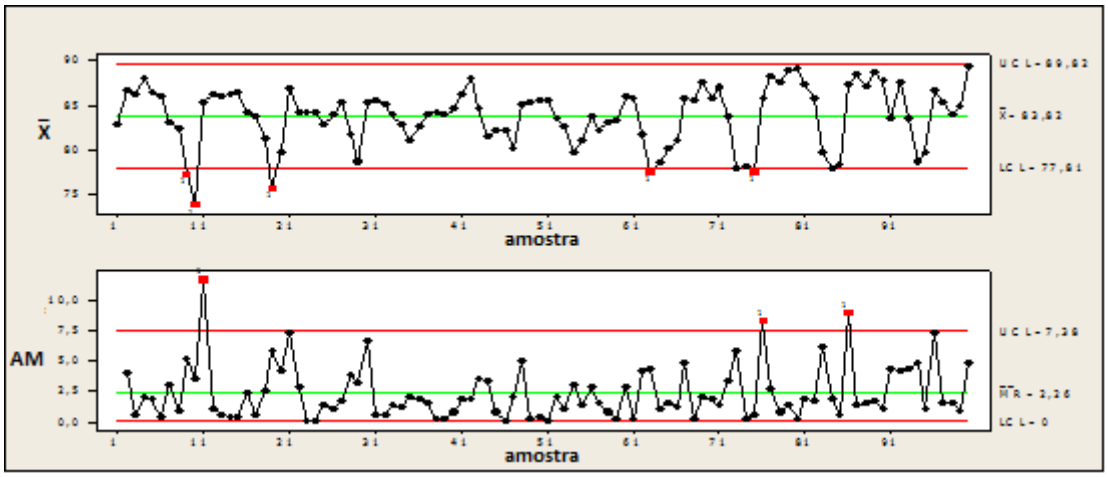

Figura 25 Carta de controle da média individual e AM (amplitude móvel), para o CUC dos 100 coletores, com aspersores compensantes a 1,5 m de altura (CUCC1,5 m).

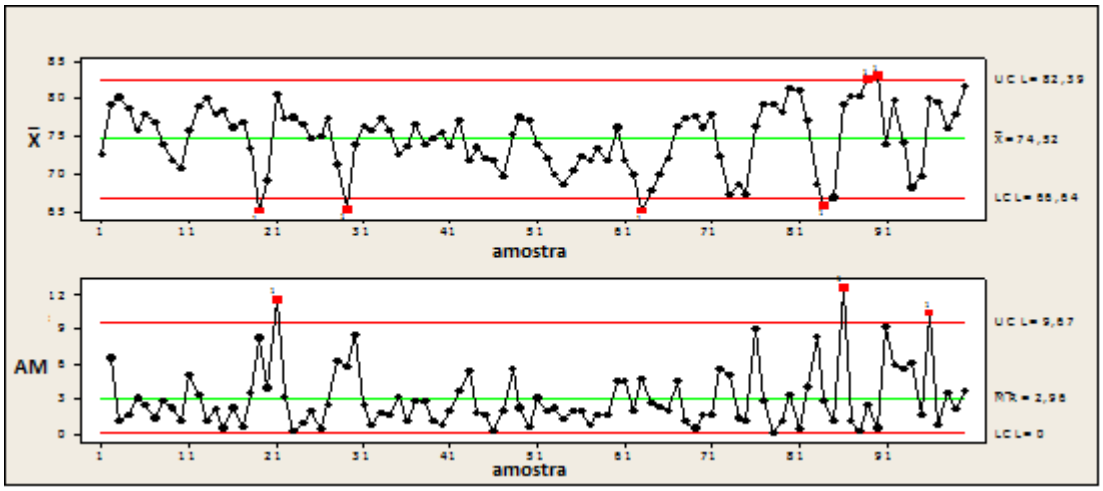

Figura 26 Carta de controle da média individual e AM (amplitude móvel), para o CUD dos 100 coletores, com aspersores compensantes a 1,5 m de altura (CUDC1,5 m).

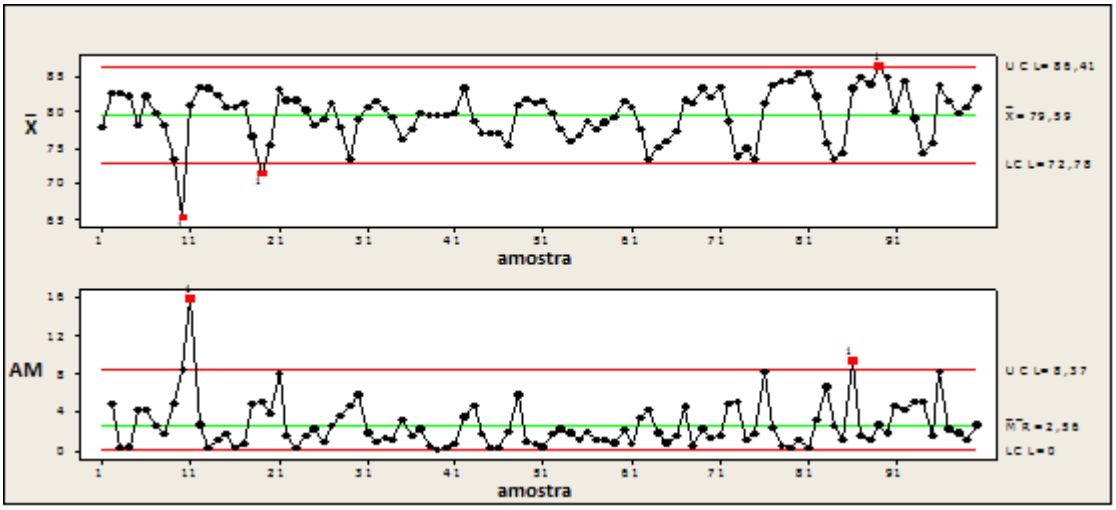

Figura 27 Carta de controle da média individual e AM (amplitude móvel), para o CUE dos 100 coletores, com aspersores compensantes a 1,5 m de altura (CUEC1,5 m).

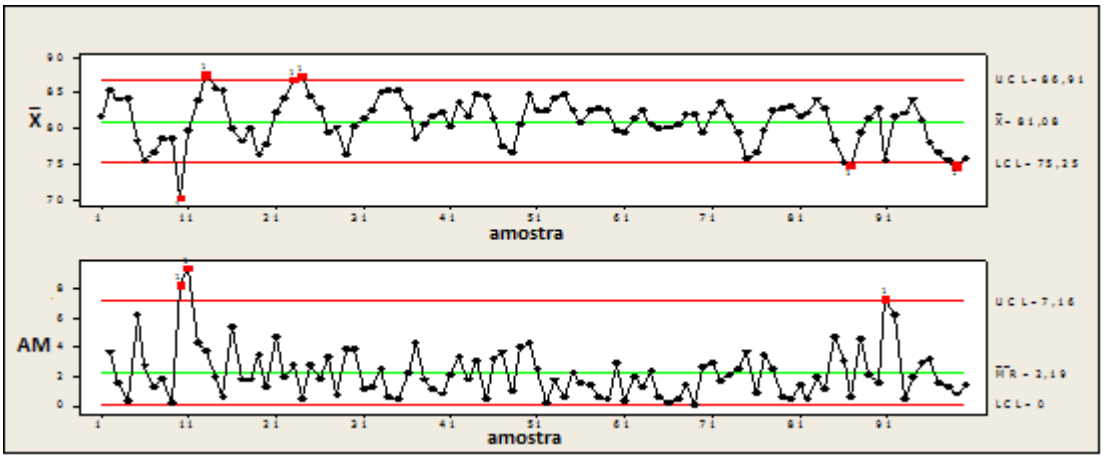

Figura 28 Carta de controle da média individual e AM (amplitude móvel), para o CUC dos 100 coletores, com aspersores não compensantes a 1,0 m de altura (CUCNC1,0 m).

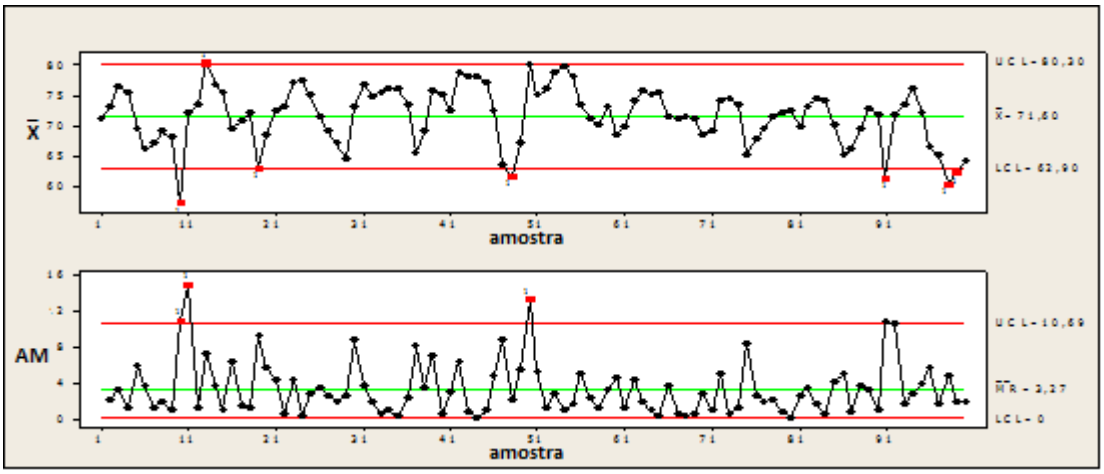

Figura 29 Carta de controle da média individual e AM (amplitude móvel), para o CUD dos 100 coletores, com aspersores não compensantes a 1,0 m de altura (CUDNC1,0 m).

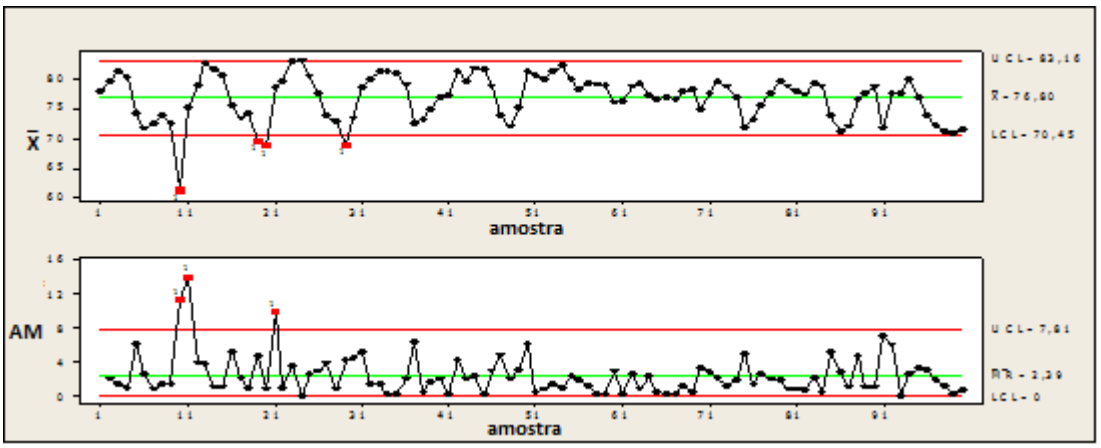

Figura 30 Carta de controle da média individual e AM (amplitude móvel), para o CUE dos 100 coletores, com aspersores não compensantes a 1,0 m de altura (CUENC1,0 m).

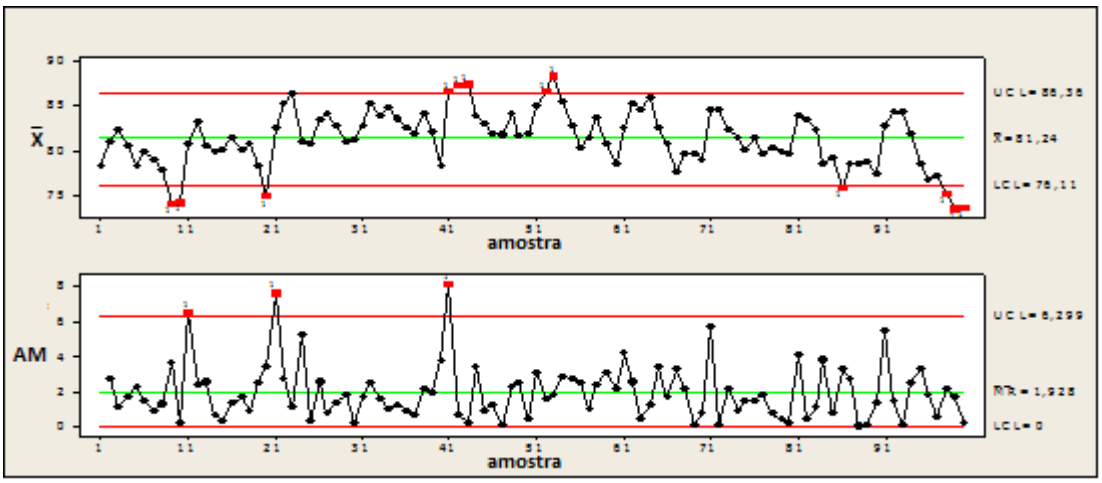

Figura 31 Carta de controle da média individual e AM (amplitude móvel), para o CUC dos 100 coletores, com aspersores não compensantes a 1,5 m de altura (CUCNC1,5 m).

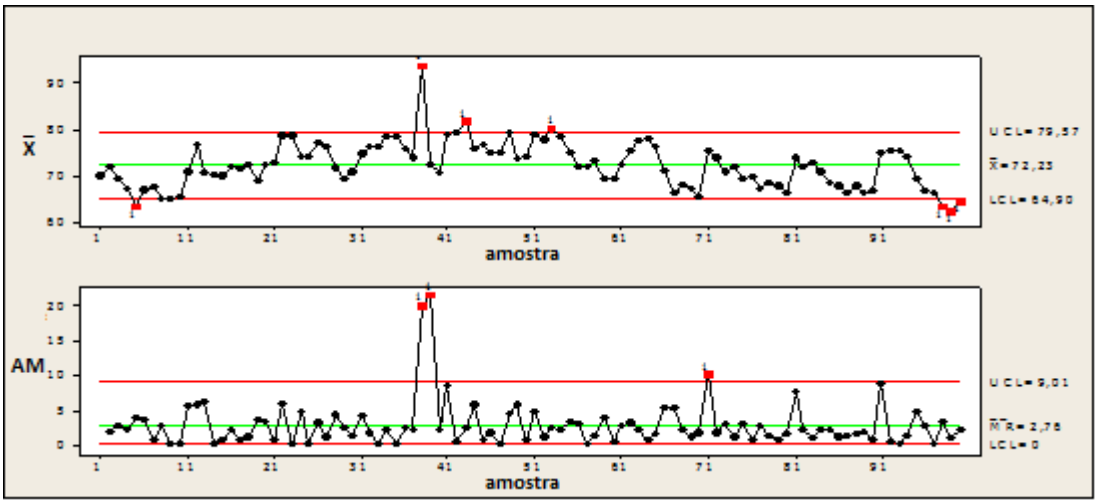

Figura 32 Carta de controle da média individual e AM (amplitude móvel), para o CUD dos 100 coletores, com aspersores não compensantes a 1,5 m de altura (CUDNC1,5 m).

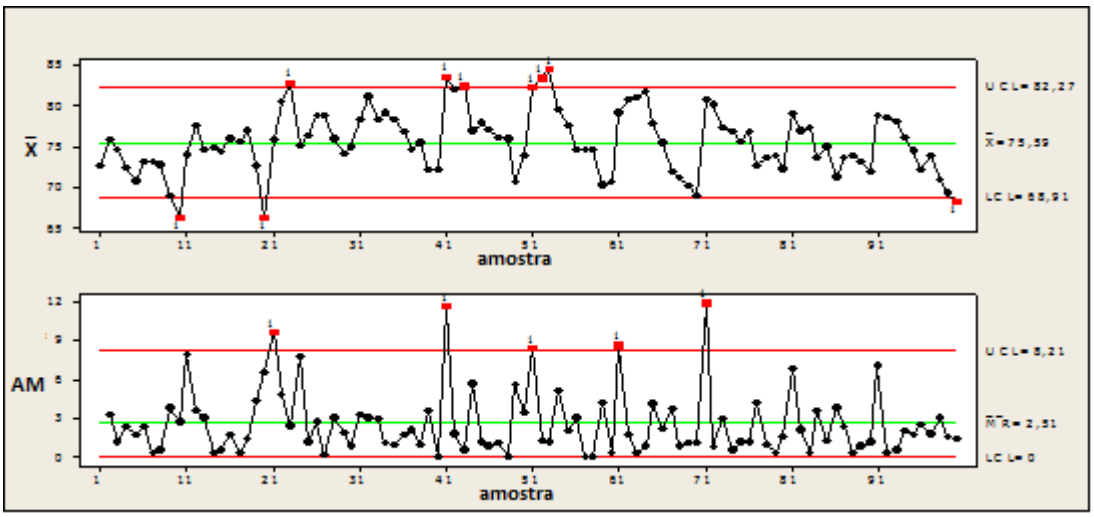

Figura 33 Carta de controle da média individual e AM (amplitude móvel), para o CUE dos 100 coletores, com aspersores não compensantes a 1,5 m de altura (CUENC1,5 m).

4.3.2 Ánalise espacial das variáveis CUC, CUD e CUE da lâmina de água de irrigação por aspersão dos 100 coletores com os aspersores compensantes e não compensantes a 1,0 m e 1,5 m de altura

Na Tabela 9, é apresentado o ajuste dos modelos espaciais, utilizando-se a análise geoestatística para as variáveis CUC, CUD e CUE, dos aspersores compensantes e não compensantes a altura de 1,0 m e 1,5 m. Foram ajustados vários modelos teóricos, tais como: esférico, exponencial, gaussiano e a família Matérn, com parâmetros de forma k = 0,5, 0,7, 1 e 1,5. Os parâmetros foram estimados pelos métodos de mínimos quadrados

ordinários (OLS), mínimos quadrdos ponderados (WLS1) e máxima verossimilhança (MV), dos quais, pelos critérios de validação cruzada (FARACO *et al*., 2008), foram escolhidos e apresentados os modelos que melhor se ajustaram às semivariâncias experimentais, para cada variável. Observa-se que, na maioria das variáveis, os modelos gaussiano e esférico predominaram, pelo critério da validação cruzada. Verifica-se que existe uma grande diferença entre os valores dos parâmetros estimados do efeito pepita $\hat{\varphi}_1$ e do patamar C = $\hat{\varphi}_1 + \hat{\varphi}_2$, nos coeficientes de uniformidade CUC, CUD e CUE, na irrigação por aspersores compensantes e não compensantes a 1,0 m e 1,5 m de altura. Existem diferenças no raio de dependência espacial nas quatro variáveis (alcance), variando de 1,95 a 12,28 m.

Segundo o coeficiente de efeito pepita relativa E(%), existe alta dependência espacial nas variáveis: CUCC1,0 m, CUDC1,0 m, CUEC1,0 m, CUCC1,5 m, CUCNC1,5 m e CUENC1,5 m (E < 25%) e moderada dependência espacial nas variáveis: CUDC1,5 m, CUEC1,5 m CUCNC1,0 m, CUDNC1,0 m, CUENC1,0 m e CUDNC1,5 m (25% ≤ E ≤ 75%).

Tabela 9 Parâmetros e modelos dos semivariogramas escalonados, para as variáveis, CUC, CUD e CUE da lâmina de água de irrigação por aspersão, dos 100 coletores com aspersores compensantes e não compensantes a 1,0 e 1,5 m de altura

Aspersor	Modelo	Método de estimação	$\hat{\varphi}_1$	C= $\hat{\varphi}_1 + \hat{\varphi}_2$	â (m)	E(%)
CUCC1,0 m	Gaussiano	WLS1	6,99	32,72	8,23	21,36
CUDC1,0 m	Gaussiano	WLS1	13,62	106,52	11,21	12,78
CUEC1,0 m	Gaussiano	WLS1	13,48	94,31	12,28	14,29
CUCC1,5 m	Esférico	WLS1	1,67	11,25	5,40	14,89
CUDC1,5 m	Gaussiano	WLS1	6,80	16,85	3,12	40,35
CUEC1,5 m	Esférico	WLS1	3,19	12,66	6,57	25,20
CUCNC1,0 m	Esférico	WLS1	2,70	9,02	6,37	29,94
CUDNC1,0 m	Gaussiano	WLS1	9,54	17,43	3,34	54,71
CUENC1,0 m	Gaussiano	OLS	4,24	13,27	3,45	31,96
CUCNC1,5 m	Esférico	RML	0,08	12,86	8,91	0,62
CUDNC1,5 m	Matérn k = 0,7	RML	11,84	36,17	1,95	32,74
CUENC1,5 m	Gaussiano	WLS1	3,84	16,69	4,83	22,99

Notas: $\hat{\varphi}_1$: estimativa do efeito pepita; C= $\hat{\varphi}_1 + \hat{\varphi}_2$ estimativa do patamar; â: estimativa alcance; E = $\hat{\varphi}_1 / \hat{\varphi}_1 + \hat{\varphi}_2$ x100: efeito pepita relativo; CUCC1,0 m: Coeficiente de Uniformidade de Christiansen dos aspersores compensantes a 1,0 m de altura; CUDC1,0 m: Coeficiente de Uniformidade de Distribuição dos aspersores compensantes a 1,0 m de altura; CUEC1,0 m: Coeficiente Estatístico de Uniformidade dos aspersores compensantes a 1,0 m de altura; CUCC1,5 m: Coeficiente de Uniformidade de Christiansen dos aspersores compensantes a 1,5 m de altura; CUDC1,5 m: Coeficiente de Uniformidade de Distribuição dos aspersores compensantes a 1,5 m de altura; CUEC1,5 m: Coeficiente Estatístico de Uniformidade dos aspersores compensantes a 1,5 m de altura; CUCNC1,0 m: Coeficiente de Uniformidade de Christiansen dos aspersores não compensantes a 1,0 m de altura; CUDNC1,0 m: Coeficiente de Uniformidade de Distribuição dos aspersores não compensantes a 1,0 m de altura; CUENC1,0 m: Coeficiente Estatístico de Uniformidade dos aspersores não compensantes a 1,0 m de altura; CUCNC1,5 m: Coeficiente de Uniformidade de Christiansen dos aspersores não compensantes a 1,5 m de altura; CUDNC1,5 m: Coeficiente de Uniformidade de Distribuição dos aspersores não compensantes a 1,5 m de altura; CUENC1,5 m: Coeficiente Estatístico de Uniformidade dos aspersores não compensantes a 1,5 m de altura; OLS: método de mínimos quadrados; WLS1: método de mínimos quadrados ponderados; RML: método de máxima verossimilhança restrita.

Nas figuras 34 a 39, são apresentados os semivariogramas e os gráficos de envelopes para os coeficientes CUC, CUD e CUE das lâminas médias de água na irrigação por aspersão dos 100 coletores, com aspersores compensantes a 1,5 m de altura.

Na Figura 34, são apresentados o semivariograma experimental e o modelo ajustado por WLS1, para CUCC1,0 m. O modelo gaussiano ajustado teve um raio de dependência espacial (alcance) estimado de 8,23 m.

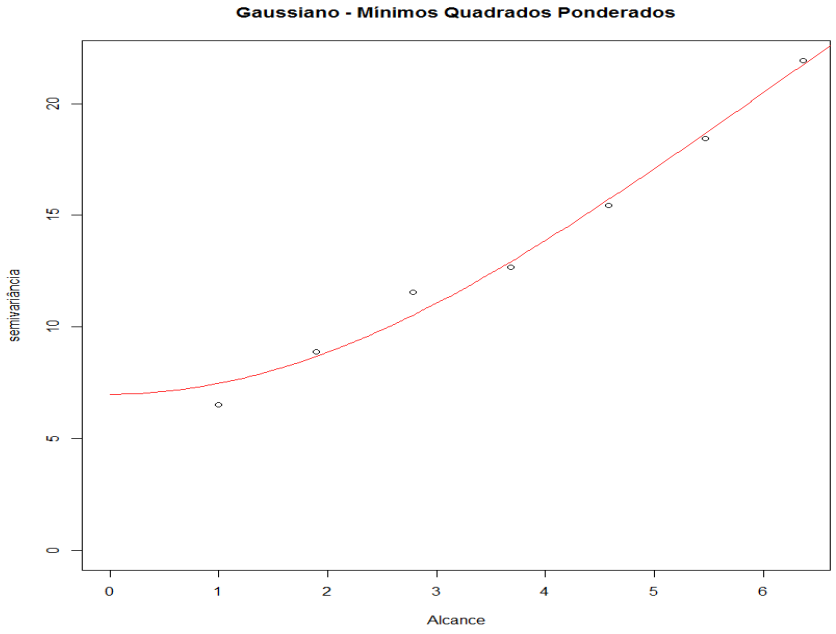

Figura 34 Semivariograma experimental e modelo ajustado do CUC, com aspersores compensantes a 1,0 m de altura (CUCC1,0 m), pelo modelo gaussiano.

Na Figura 35, apresenta-se o gráfico de envelope das semivariâncias do CUCC1,0 m. Observa-se um ponto muito perto e outro ponto próximo do limite inferior do envelope, mostrando a continuidade espacial.

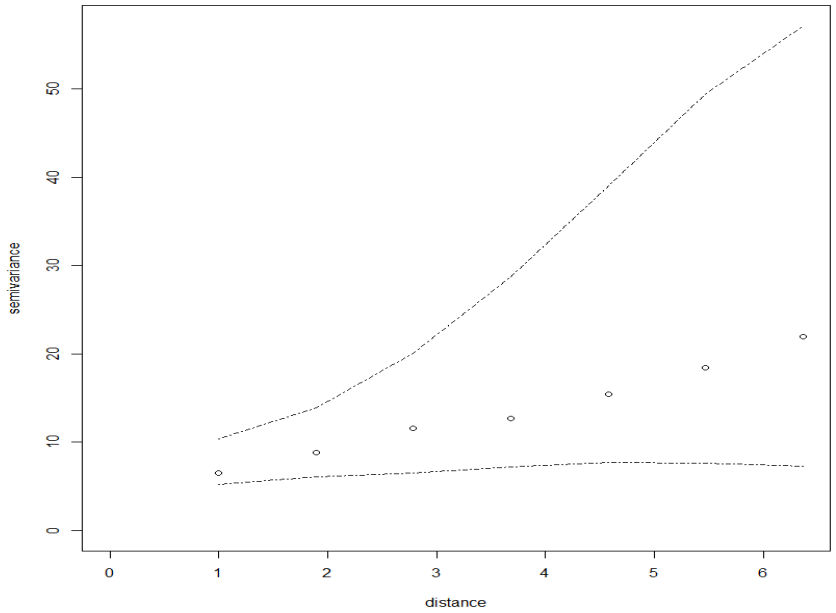

Figura 35 Envelope das semivariâncias CUCC1,0 m.

Na Figura 36, são apresentados o semivariograma experimental e o modelo ajustado por WLS1, para CUDC1,0 m. O modelo gaussiano ajustado teve um raio de dependência espacial (alcance) estimado de 11,21 m.

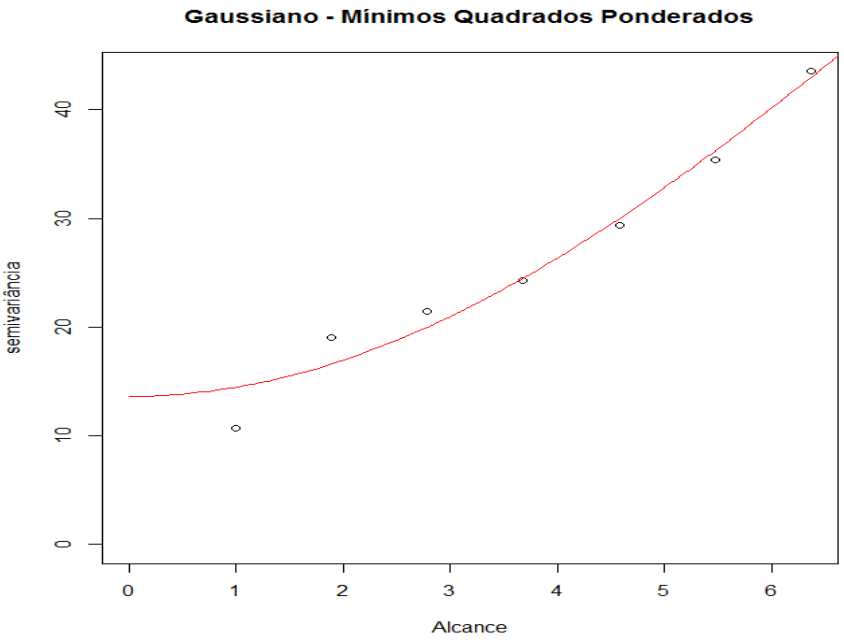

Figura 36 Semivariograma experimental e modelo ajustado do CUD, com aspersores compensantes a 1,0 m de altura (CUDC1,0 m), pelo modelo gaussiano.

Na Figura 37, apresenta-se o gráfico de envelope das semivariâncias do CUDC1,0 m. Observa-se um ponto muito perto e outros três próximos do limite inferior do envelope, mostrando a continuidade espacial.

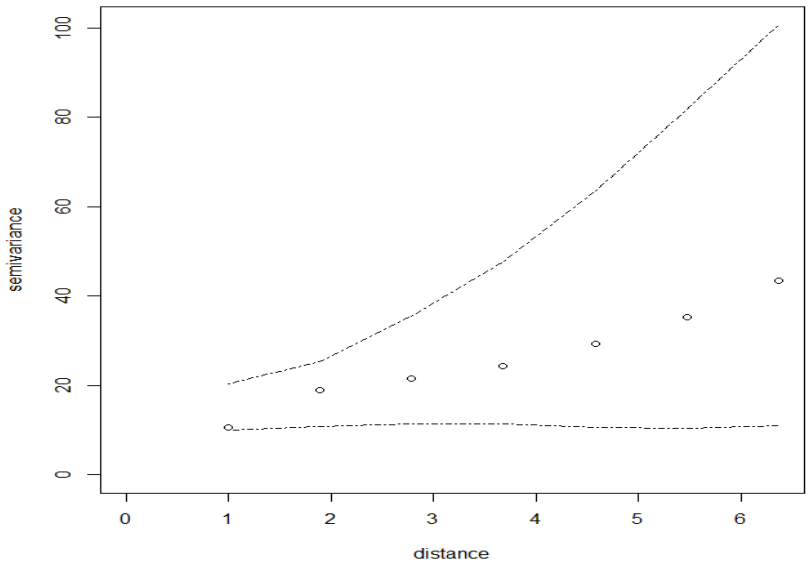

Figura 37 Envelope das semivariâncias do CUDC1,0 m.

Na Figura 38, são apresentados o semivariograma experimental e o modelo ajustado por WLS1 para CUEC1,0 m. O modelo gaussiano ajustado teve um raio de dependência espacial (alcance) estimado de 12,28 m.

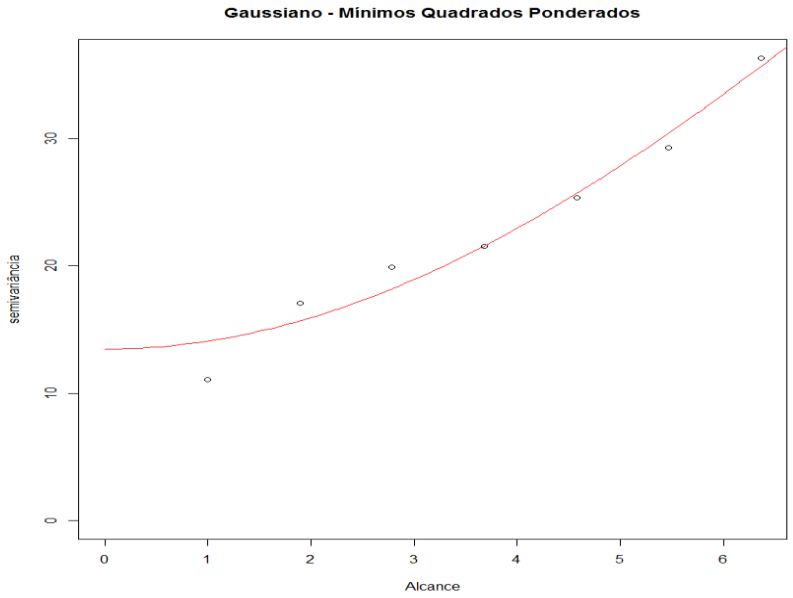

Figura 38 Semivariograma experimental e modelo ajustado do CUE, com aspersores compensantes a 1,0 m de altura (CUEC1,0 m), pelo modelo gaussiano.

Na Figura 39, apresenta-se o gráfico de envelope das semivariâncias do CUEC1,0 m. Observa-se um ponto muito perto e outros três pontos próximos do limite inferior do envelope, mostrando a continuidade espacial.

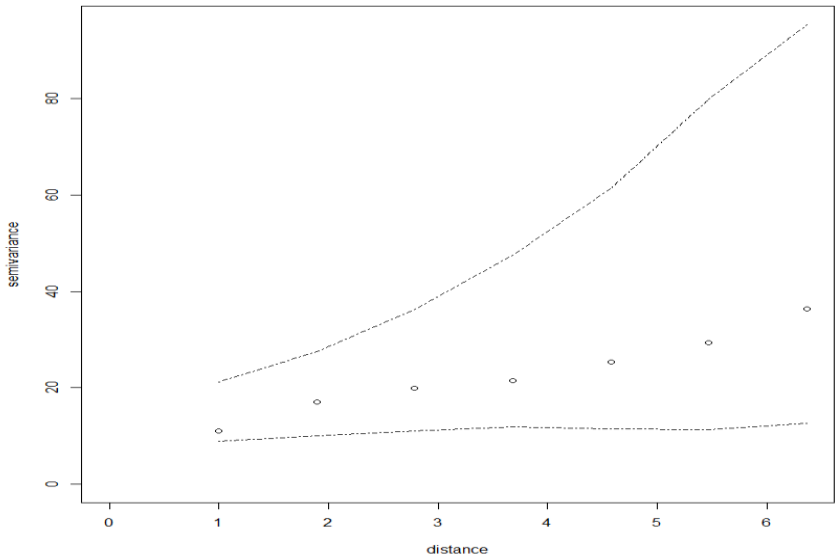

Figura 39 Envelope das semivariâncias do CUEC1,0 m.

Nas figuras 40 a 45, são apresentados os semivariogramas e os gráficos de envelopes para os coeficientes CUC, CUD e CUE das lâminas médias de água na irrigação por aspersão dos 100 coletores, com aspersores compensantes a 1,5 m de altura.

Na Figura 40, são apresentados o semivariograma experimental e o modelo ajustado por WLS1 para CUCC1,5 m. O modelo esférico ajustado teve um raio de dependência espacial (alcance) estimado de 5,40 m.

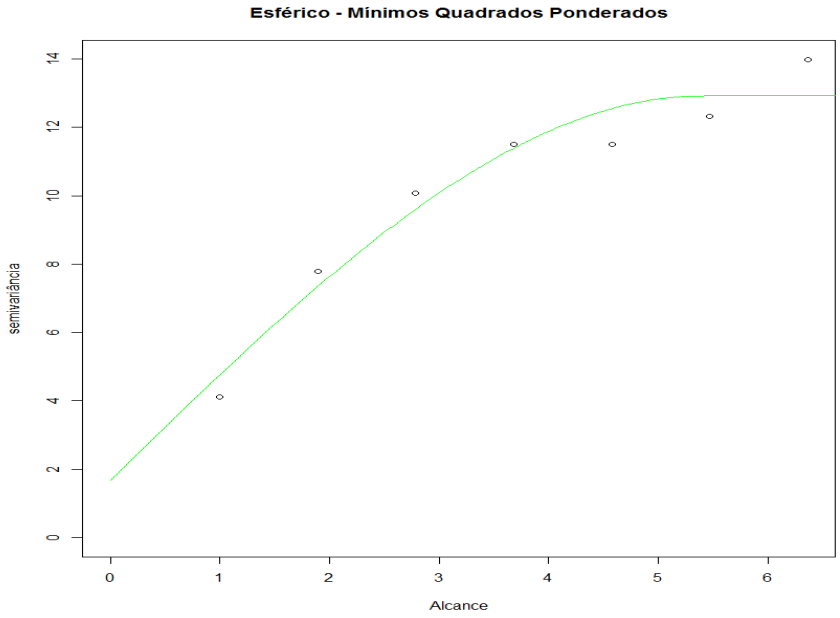

Figura 40 Semivariograma experimental e modelo ajustado do CUC, com aspersores compensantes a 1,5 m de altura (CUCC1,5 m), pelo modelo esférico.

Na Figura 41, apresenta-se o gráfico de envelope das semivariâncias do CUCC1,5 m. Observa-se um ponto muito perto e outro ponto próximo do limite inferior do envelope, mostrando a continuidade espacial.

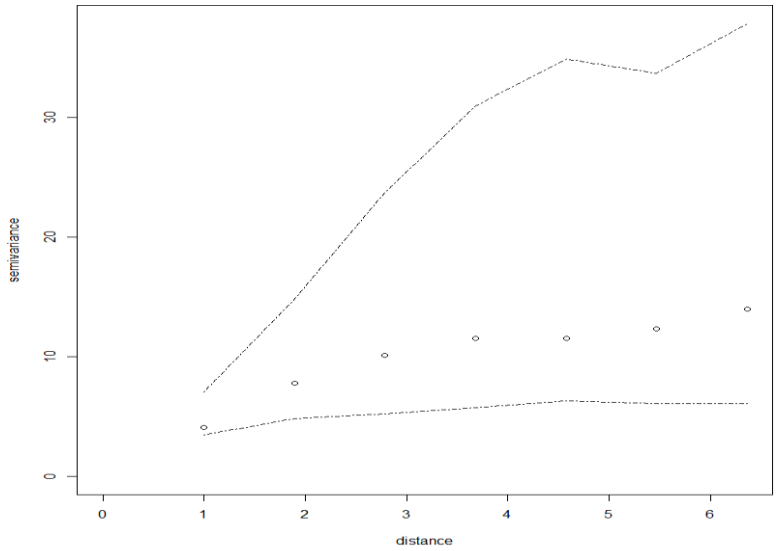

Figura 41 Envelope das semivariâncias do CUCC1,5 m.

Na Figura 42, são apresentados o semivariograma experimental e o modelo ajustado por WLS1 para CUDC1,5 m. O modelo gaussiano ajustado teve um raio de dependência espacial (alcance) estimado de 3,12 m.

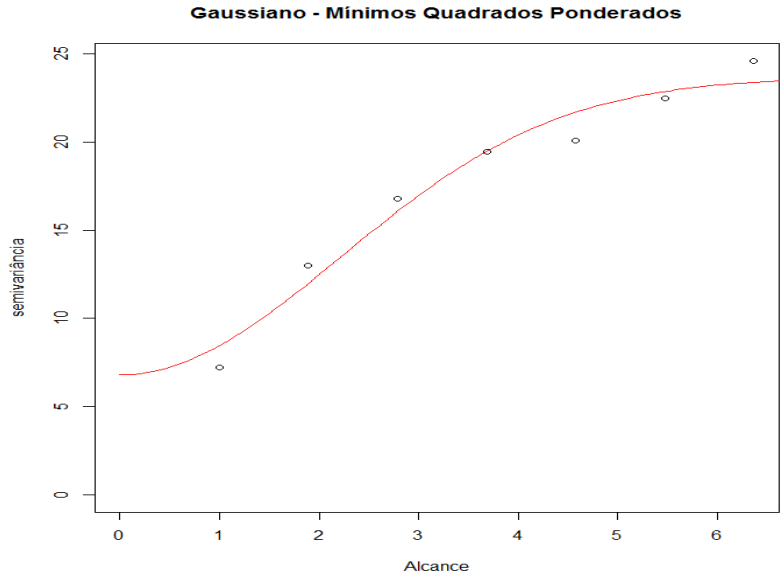

Figura 42 Semivariograma experimental e modelo ajustado do CUD, com aspersores compensantes a 1,5 m de altura (CUDC1,5 m), pelo modelo gaussiano.

Na Figura 43, apresenta-se o gráfico de envelope das semivariâncias do CUDC1,5 m. Observa-se um ponto muito perto e outro ponto próximo do limite inferior do envelope, mostrando a continuidade espacial.

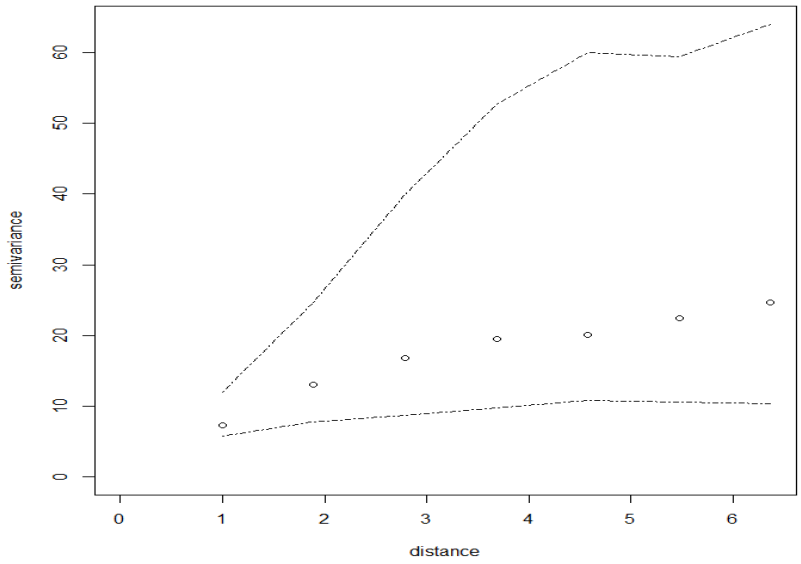

Figura 43 Envelope das semivariâncias do CUDC1,5 m.

Na Figura 44, são apresentados o semivariograma experimental e o modelo ajustado por WLS1 para CUEC1,5 m. O modelo esférico ajustado teve um raio de dependência espacial (alcance) estimado de 6,57 m.

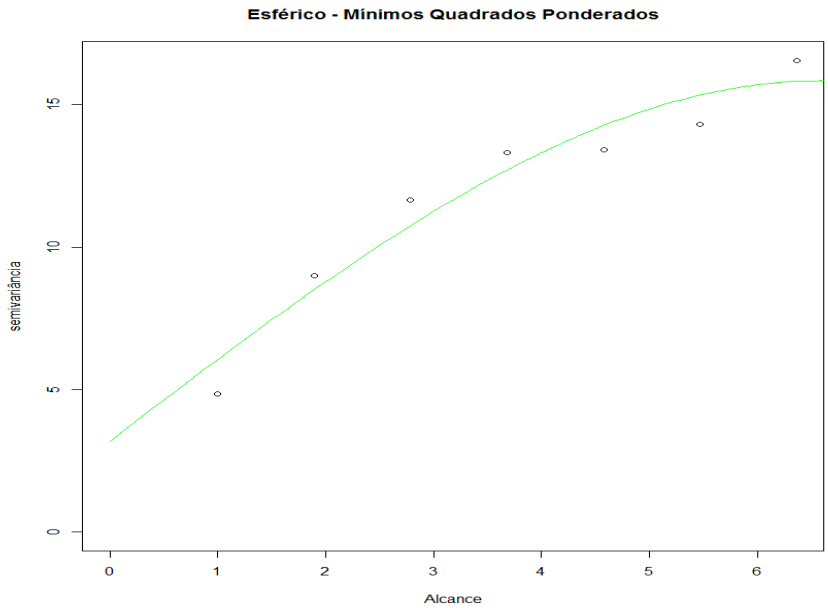

Figura 44 Semivariograma experimental e modelo ajustado do CUE, com aspersores compensantes a 1,5 m de altura (CUEC1,5 m), pelo modelo esférico.

Na Figura 45, apresenta-se o gráfico de envelope das semivariâncias do CUEC1,5 m. Observa-se um ponto muito perto e outro ponto próximo do limite inferior do envelope, mostrando a continuidade espacial.

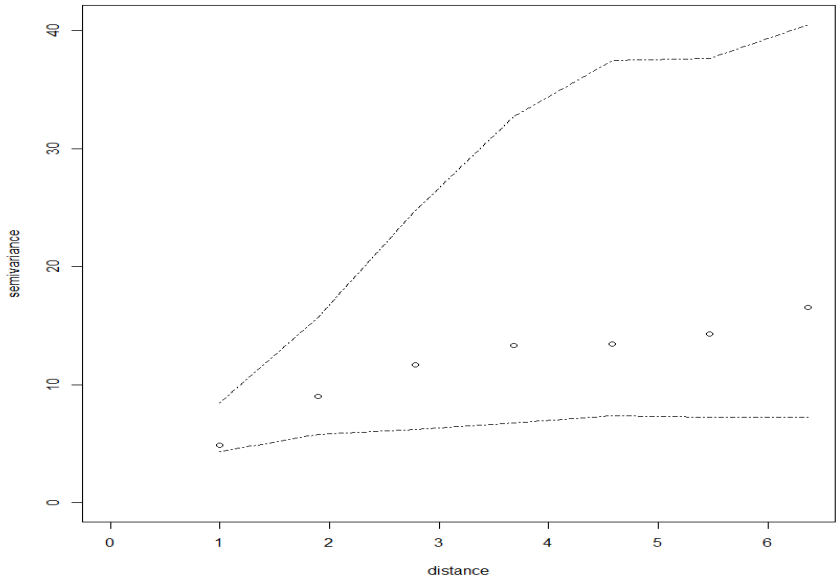

Figura 45 Envelope das semivariâncias do CUDC1,5 m.

Nas figuras 46 a 51, são apresentados os semivariogramas e os envelopes para os coeficientes CUC, CUD e CUE das lâminas médias de água na irrigação por aspersão dos 100 coletores, com aspersores não compensantes a 1,0 m de altura.

Na Figura 46, são apresentados o semivariograma experimental e o modelo ajustado por WLS1 para CUENC1,0 m. O modelo esférico ajustado teve um raio de dependência espacial (alcance) estimado de 6,37 m.

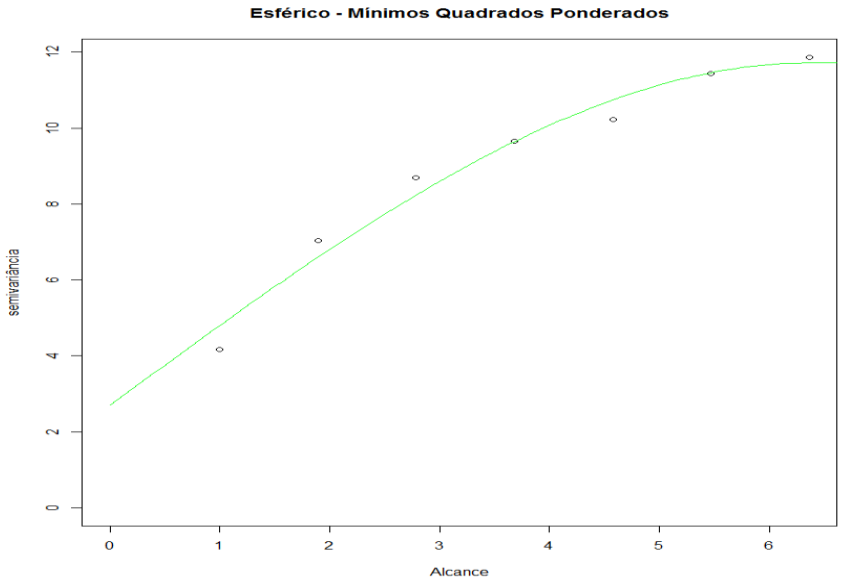

Figura 46 Semivariograma experimental e modelo ajustado do CUC, com aspersores não compensantes a 1,0 m de altura (CUCNC1,0 m), pelo modelo esférico.

Na Figura 47, apresenta-se o gráfico de envelope das semivariâncias do CUCNC1,0 m. Observa-se um ponto perto e outro ponto próximo do limite inferior do envelope, mostrando a continuidade espacial.

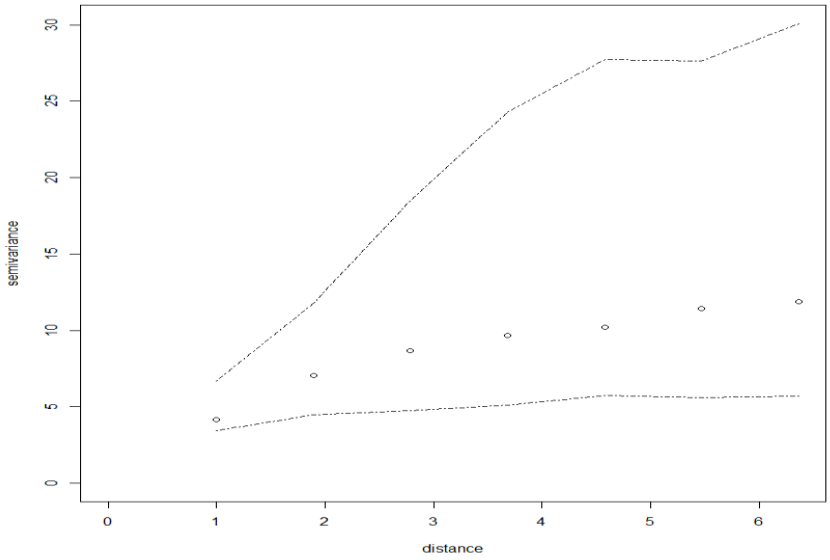

Figura 47 Envelope das semivariâncias do CUCNC1,0 m.

Na Figura 48, são apresentados o semivariograma experimental e o modelo ajustado por WLS1 para CUDNC1,0 m. O modelo gaussiano ajustado teve um raio de dependência espacial (alcance) estimado de 3,34 m.

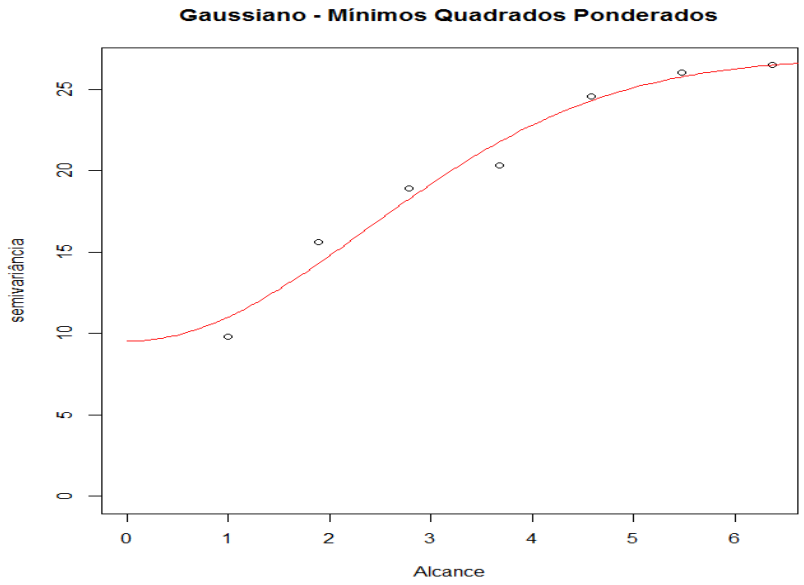

Figura 48 Semivariograma experimental e modelo ajustado do CUD, com aspersores não compensantes a 1,0 m de altura (CUDNC1,0 m), pelo modelo gaussiano.

Na Figura 49, apresenta-se o gráfico de envelope das semivariâncias do CUDNC1,0 m. Observa-se um ponto perto e três próximos do limite inferior do envelope, mostrando a continuidade espacial.

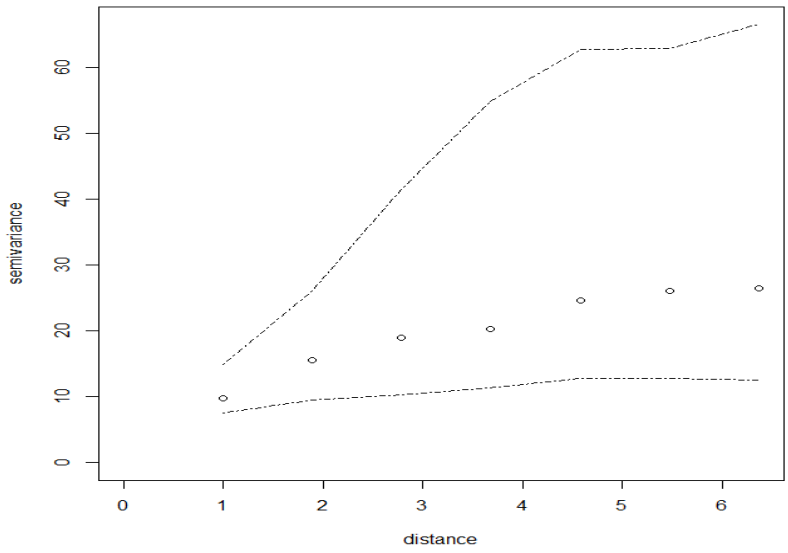

Figura 49 Envelope das semivariâncias do CUDNC1,0 m.

Na Figura 50, são apresentados o semivariograma experimental e o modelo ajustado por OLS para CUENC1,0 m. O modelo gaussiano ajustado teve um raio de dependência espacial (alcance) estimado de 3,45 m.

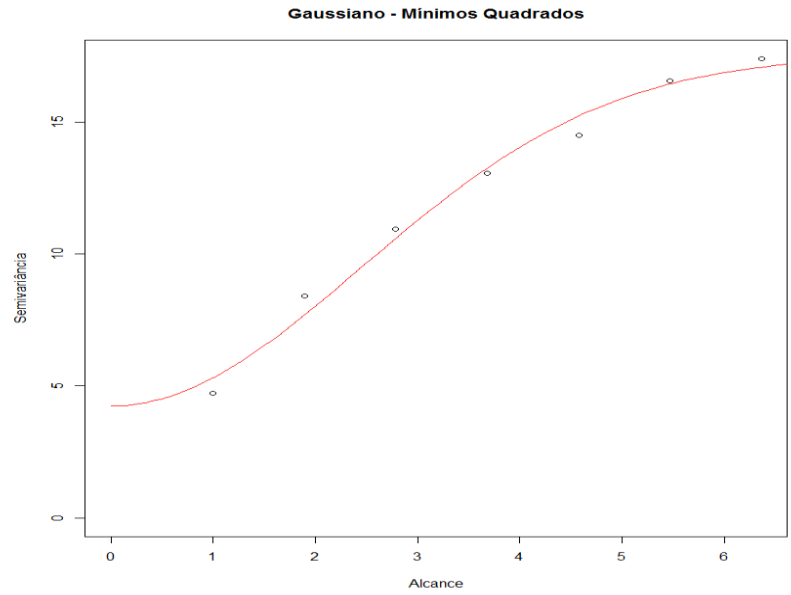

Figura 50 Semivariograma experimental e modelo ajustado do CUE, com aspersores não compensantes a 1,0 m de altura (CUENC1,0 m), pelo modelo gaussiano.

Na Figura 51, apresenta-se o gráfico de envelope das semivariâncias do CUENC1,0 m. Observa-se um ponto muito perto e um ponto perto do limite inferior do envelope, mostrando a continuidade espacial.

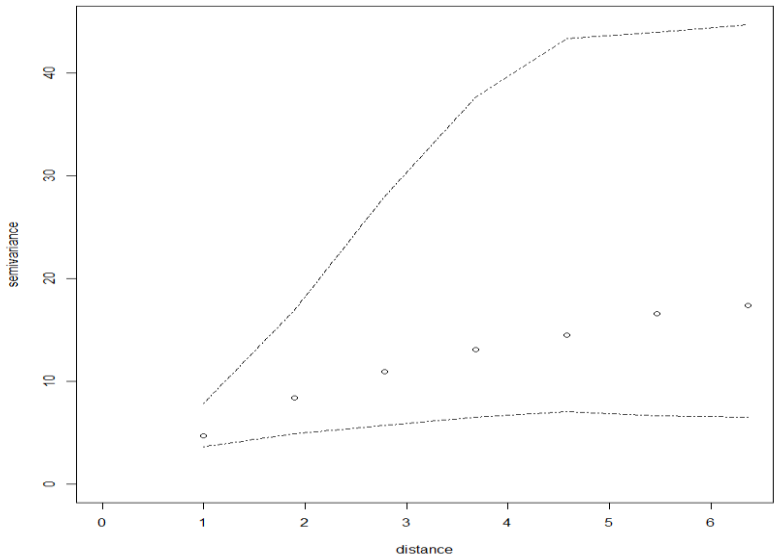

Figura 51 Envelope das semivariâncias do CUENC1,0 m.

Nas figuras 52 a 57, são apresentados os semivariogramas e os envelopes para os coeficientes CUC, CUD e CUE das lâminas médias de água na irrigação por aspersão dos 100 coletores, com aspersores não compensantes a 1,5 m de altura.

Na Figura 52, são apresentados o semivariograma experimental e o modelo ajustado por RML para CUCNC1,5 m. O modelo esférico ajustado teve um raio de dependência espacial (alcance) estimado de 8,91 m.

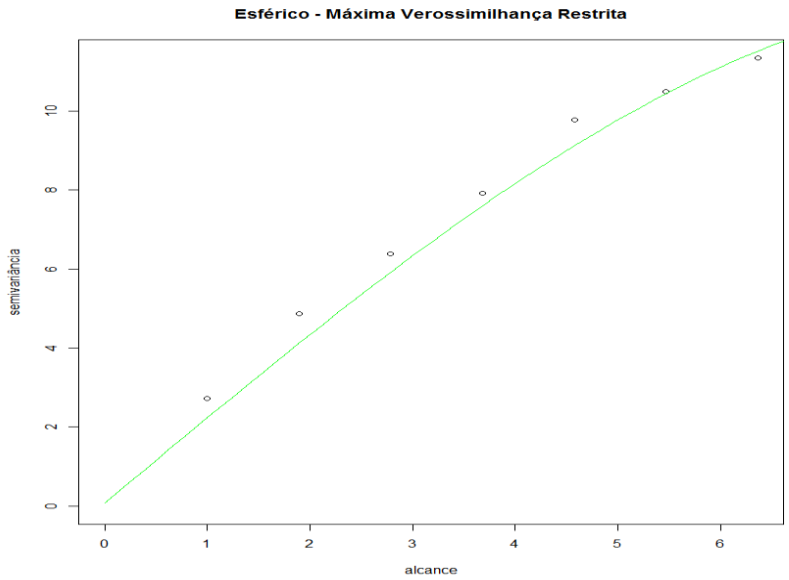

Figura 52 Semivariograma experimental e modelo ajustado do CUC, com aspersores não compensantes a 1,5 m de altura (CUCNC1,5 m), pelo modelo esférico.

Na Figura 53, apresenta-se o gráfico de envelope das semivariâncias do CUCNC1,5 m. Observam-se três pontos perto do limite inferior do envelope, mostrando a continuidade espacial.

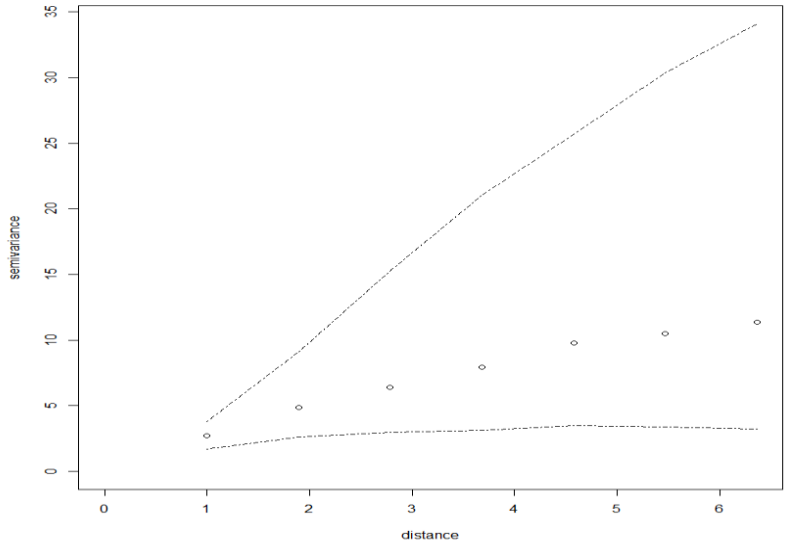

Figura 53 Envelope das semivariâncias do CUCNC1,5 m.

Na Figura 54, são apresentados o semivariograma experimental e o modelo ajustado por RML para CUDNC1,5 m. O modelo Matérn com parâmetro de forma k = 0,7 ajustado teve um raio de dependência espacial (alcance) estimado de 1,95 m.

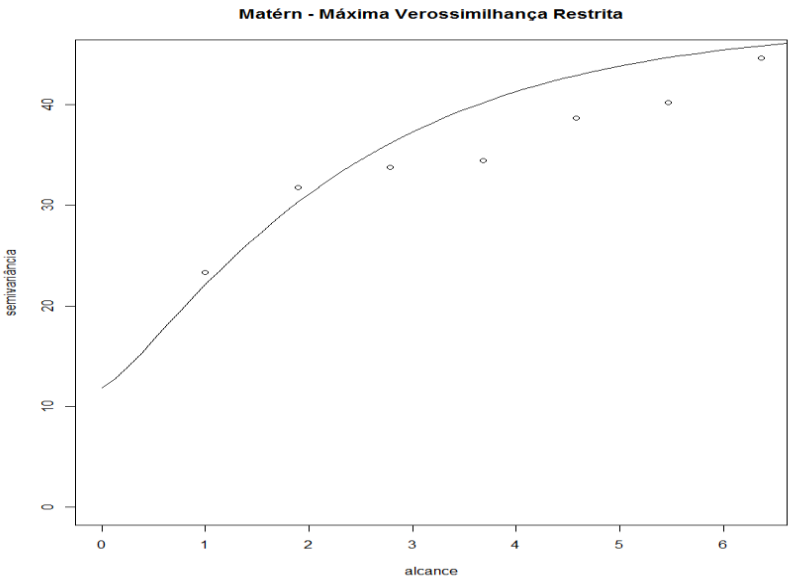

Figura 54 Semivariograma experimental e modelo ajustado do CUD, com aspersores não compensantes a 1,5 m de altura (CUDNC1,5 m), pelo modelo Matérn.

Na Figura 55, apresenta-se o gráfico de envelope das semivariâncias do CUDNC1,5 m. Observam-se quatro pontos perto do limite inferior do envelope, mostrando a continuidade espacial.

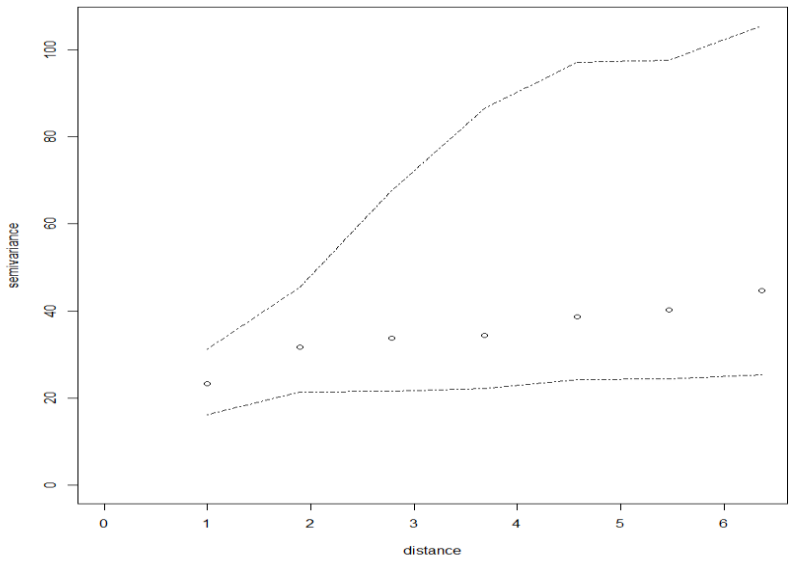

Figura 55 Envelope das semivariâncias do CUDNC1,5 m.

Na Figura 56, são apresentados o semivariograma experimental e o modelo ajustado por WLS1 para CUENC1,5 m. O modelo gaussiano ajustado teve um raio de dependência espacial (alcance) estimado de 4,83 m.

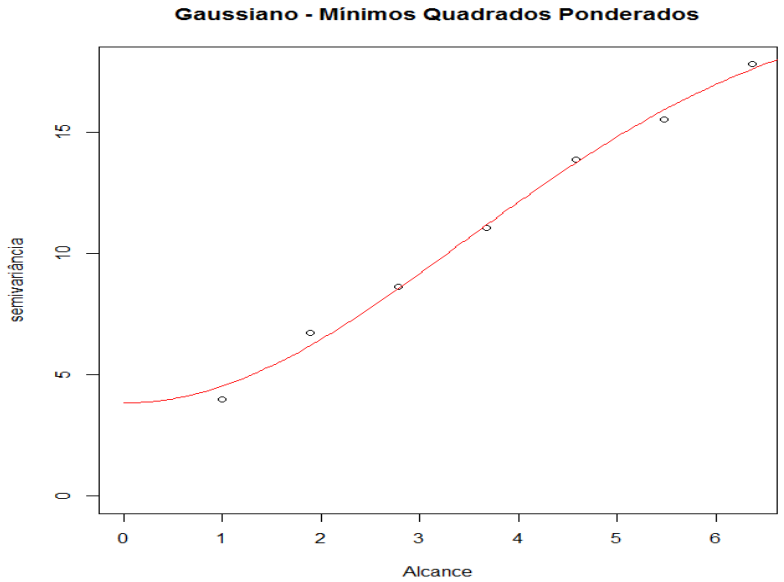

Figura 56 Semivariograma experimental e modelo ajustado do CUE, com aspersores não compensantes a 1,5 m de altura (CUENC1,5 m), pelo modelo gaussiano.

Na Figura 57, apresenta-se o gráfico de envelope das semivariâncias do CUENC1,5 m. Observam-se três pontos perto do limite inferior do envelope, mostrando a continuidade espacial.

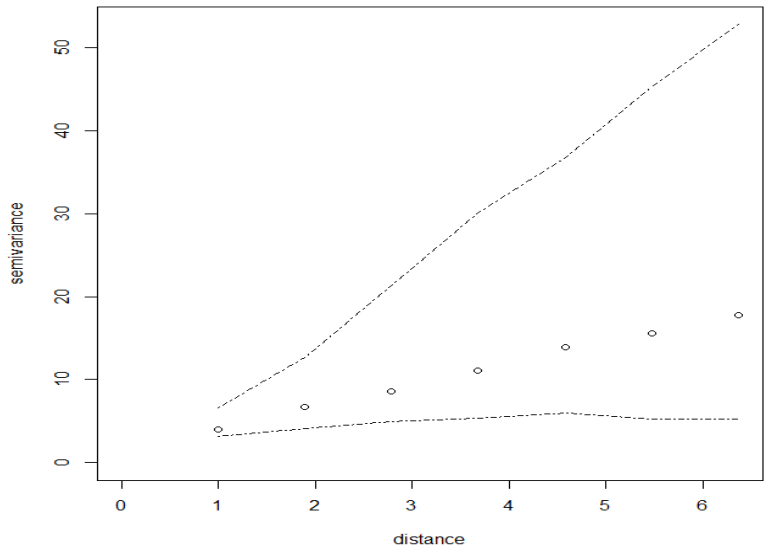

Figura 57 Envelope das semivariâncias do CUENC1,5 m.

4.3.3 Mapas temáticos dos CUC, CUD e CUE das lâminas médias de água de irrigação por aspersão dos 100 coletores

Foram construídos os mapas temáticos para as 12 variáveis em estudo: CUCC1,0 m, CUDC1,0 m, CUEC1,0 m, CUCC1,5 m, CUDC1,5 m, CUEC1,5 m, CUCNC1,0 m, CUDNC1,0 m CUENC1,0 m, CUCNC1,5 m, CUDNC1,5 m e CUENC1,5 m, por meio da técnica da krigagem ordinária, que considera as características espaciais do modelo escolhido e estimativas dos parâmetros φ_1, φ_2 e φ_3, em cada caso. Verifica-se que, com os aspersores compensantes de 1,0 m de altura, ocorreu uma concentração dos coeficientes de uniformidade nos mapas de CUC, CUD e CUE, em que a área central apresentou o coeficiente acima de 80% ficando dentro os parâmetros ideais de eficiência de aplicação média dos sistemas de irrigação por aspersão convencional (MANTOVANI; BERNARDO; PALARETTI, 2007), enquanto nos outros mapas, com aspersores compensantes de 1,5 m de altura e aspersores não compensantes de 1,0 e 1,5 m de altura, verificaram-se setores com maior e menor coeficiente de uniformidade.

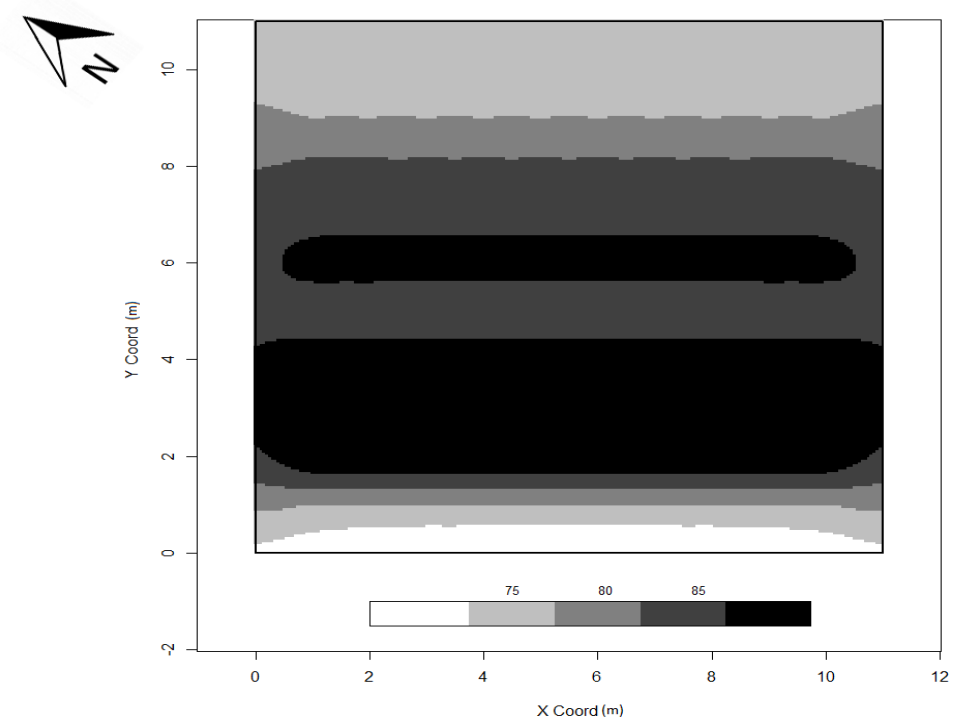

Figura 58 Mapa temático do CUC das lâminas médias de água de irrigação por aspersão, dos 100 coletores com aspersores compensantes a 1,0 m de altura (CUCC1,0 m)

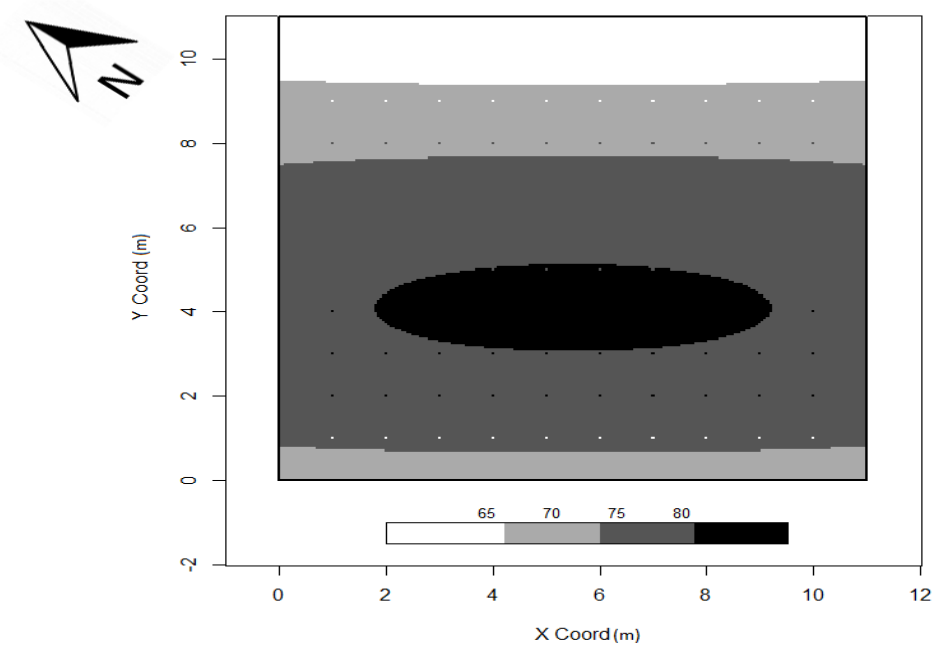

Figura 59 Mapa temático do CUD das lâminas médias de água, dos 100 coletores com aspersores compensantes a 1,0 m de altura (CUDC1,0 m).

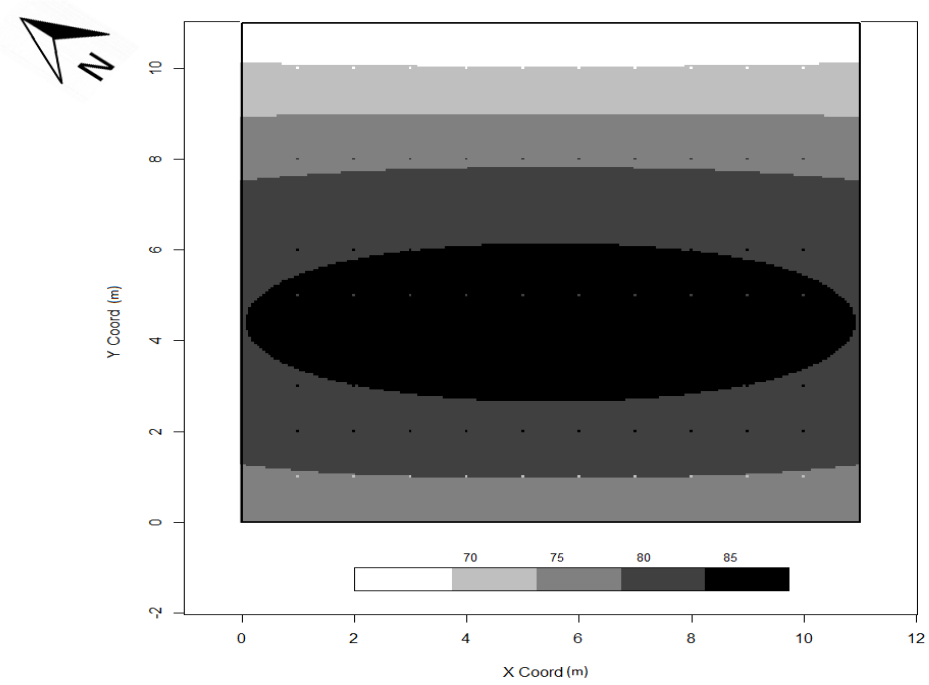

Figura 60 Mapa temático do CUE das lâminas médias de água de irrigação por aspersão, dos 100 coletores com aspersores compensantes a 1,0 m de altura (CUEC1,0 m).

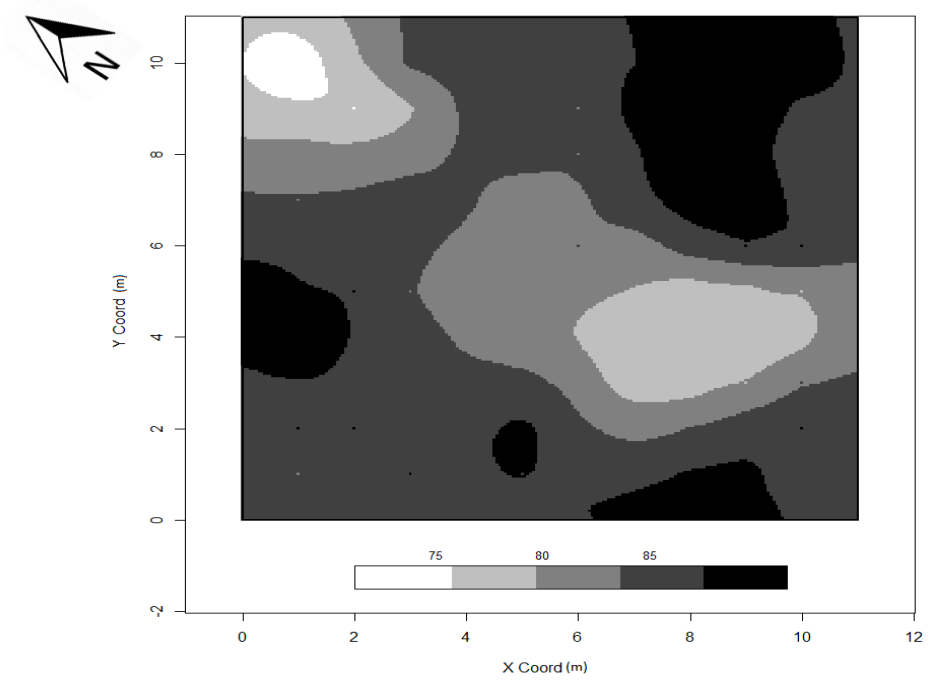

Figura 61 Mapa temático do CUC das lâminas médias de água de irrigação por aspersão, dos 100 coletores com aspersores compensantes a 1,5 m de altura (CUCC1,5 m).

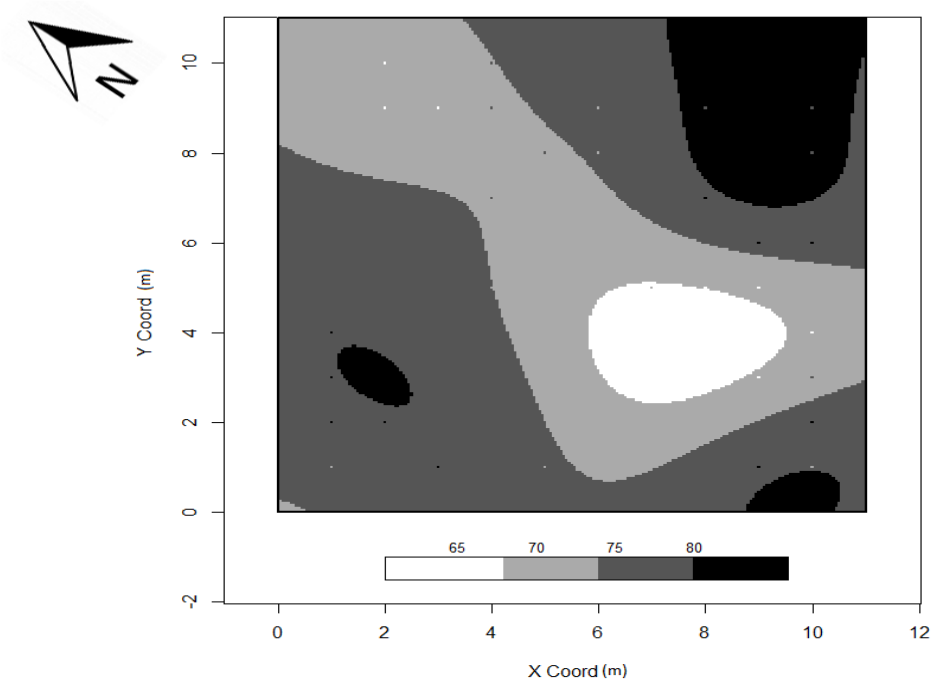

Figura 62 Mapa temático do CUD das lâminas médias de água de irrigação por aspersão, dos 100 coletores com aspersores compensantes a 1,5 m de altura (CUDC1,5 m).

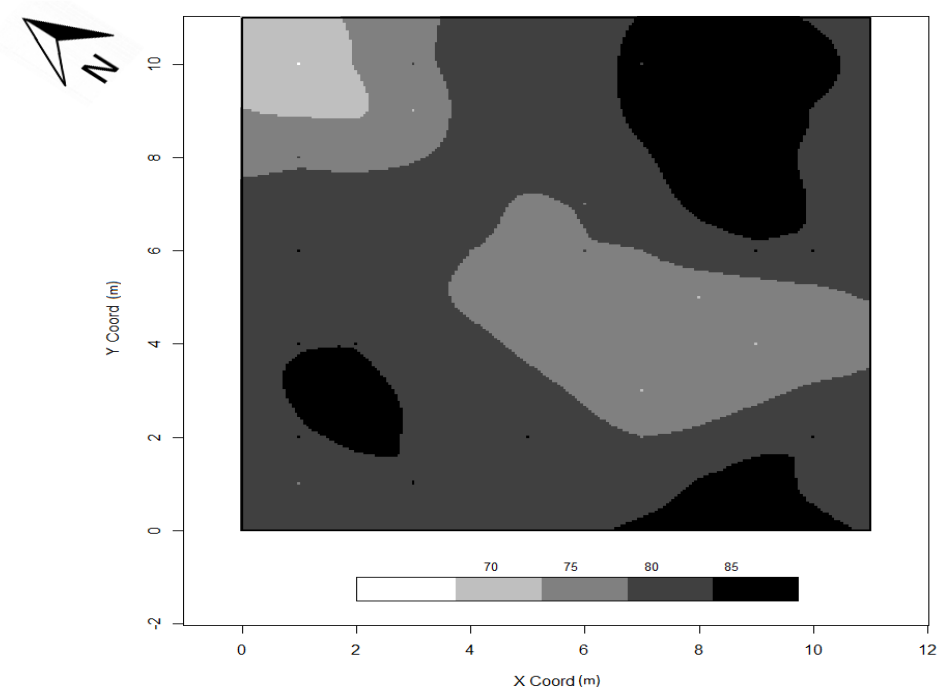

Figura 63 Mapa temático do CUE das lâminas médias de água de irrigação por aspersão, dos 100 coletores com aspersores compensantes a 1,5 m de altura (CUEC1,5 m).

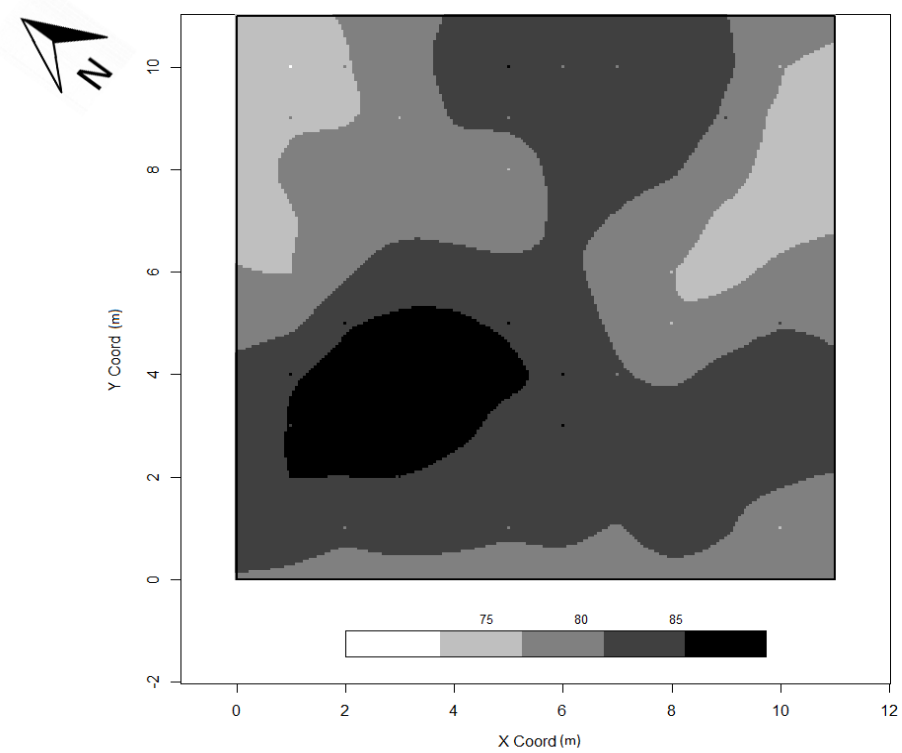

Figura 64 Mapa temático do CUC das lâminas médias de água de irrigação por aspersão, dos 100 coletores com aspersores não compensantes a 1,0 m de altura (CUCNC1,0 m).

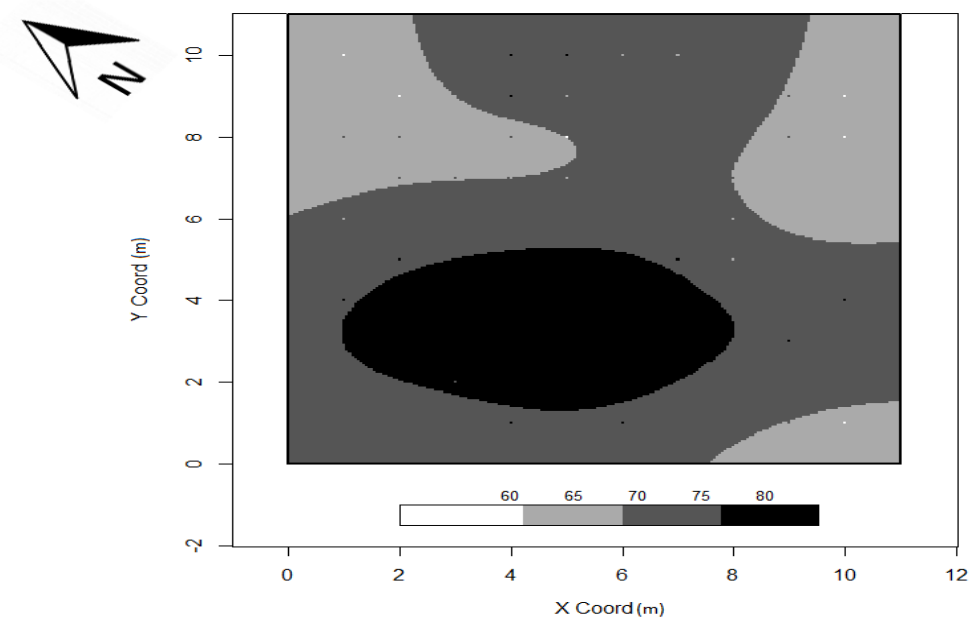

Figura 65 Mapa temático do CUD das lâminas médias de água de irrigação por aspersão, dos 100 coletores com aspersores não compensantes a 1,0 m de altura (CUDNC1,0 m).

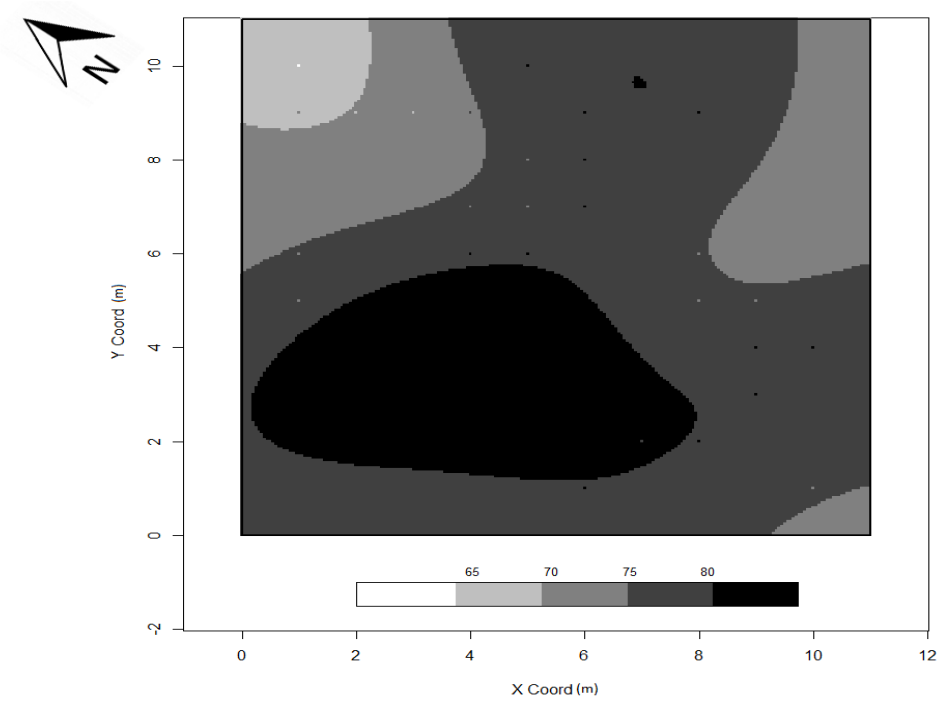

Figura 66 Mapa temático do CUE das lâminas médias de água de irrigação por aspersão, dos 100 coletores com aspersores não compensantes a 1,0 m de altura (CUENC1,0 m).

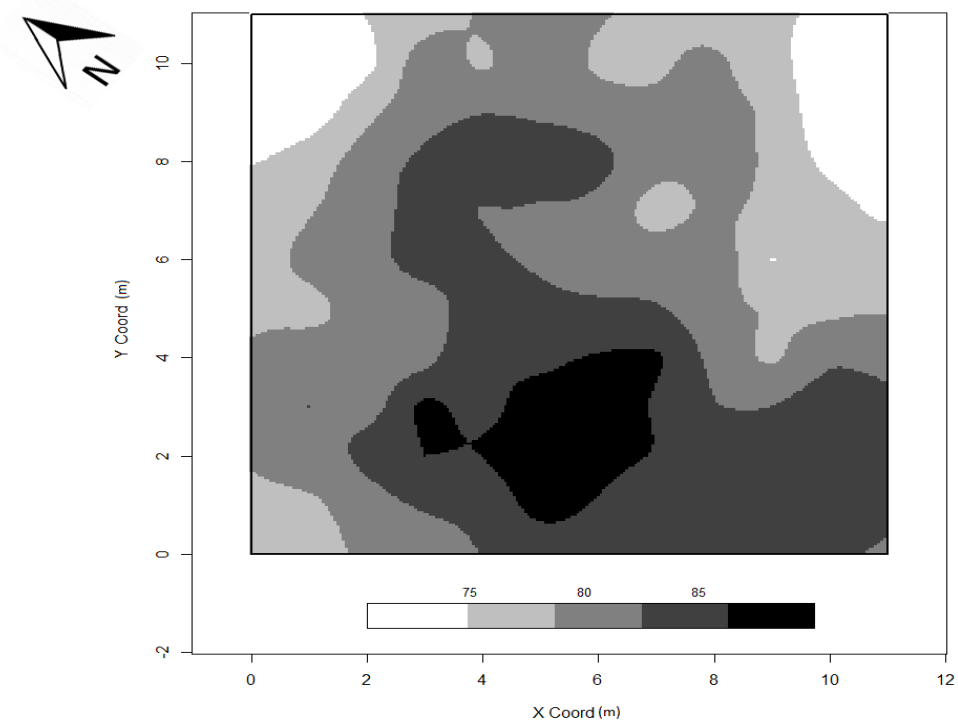

Figura 67 Mapa temático do CUC das lâminas médias de água de irrigação por aspersão, dos 100 coletores com aspersores não compensantes a 1,5 m de altura (CUCNC1,5 m).

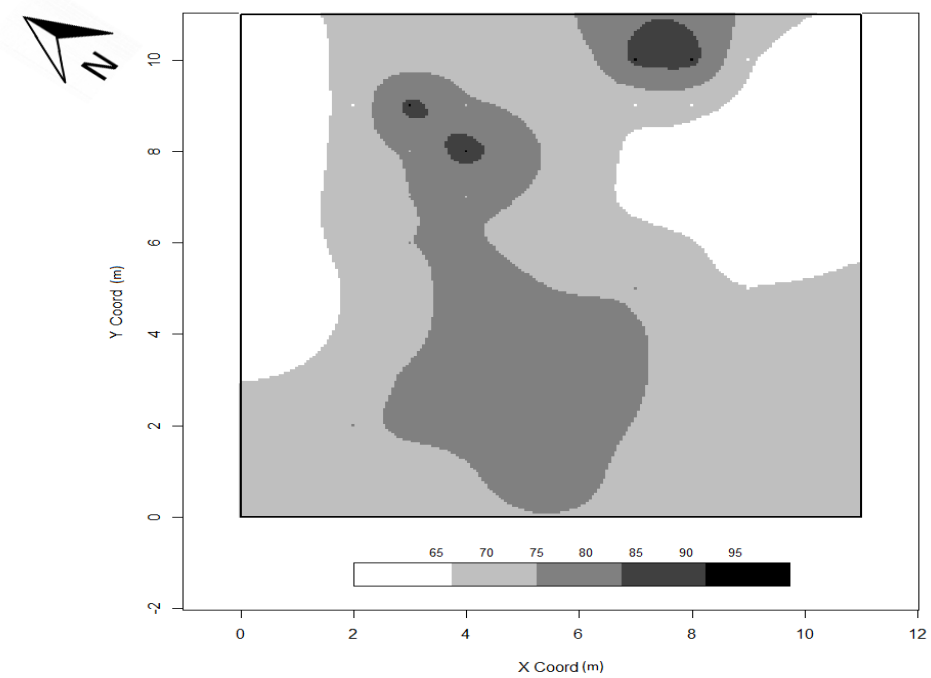

Figura 68 Mapa temático do CUD das lâminas médias de água de irrigação por aspersão, dos 100 coletores com aspersores compensantes a 1,5 m de altura (CUDNC1,5 m).

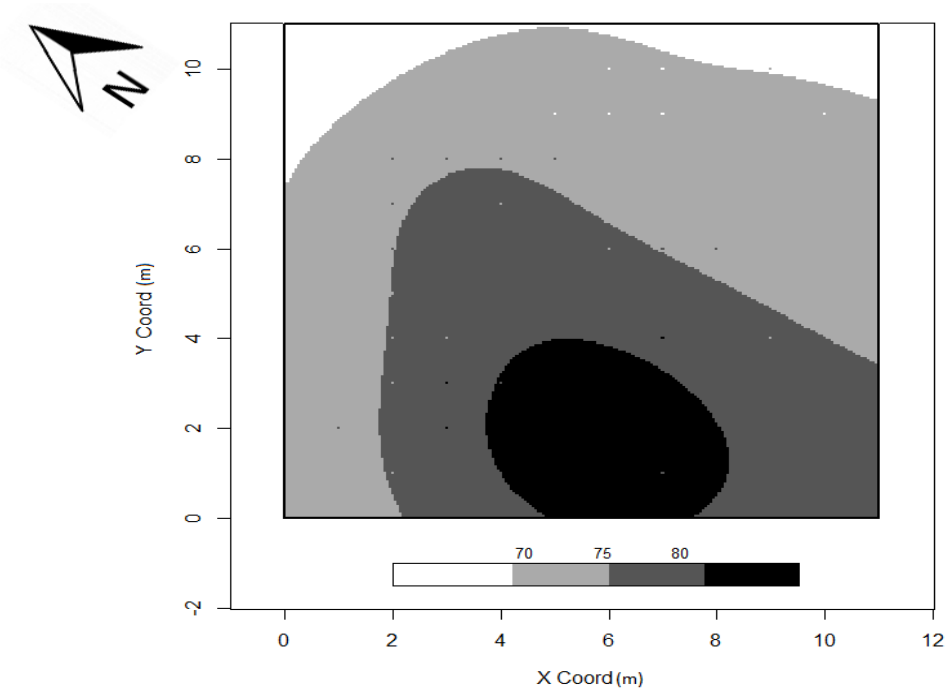

Figura 69 Mapa temático do CUE das lâminas médias de água de irrigação por aspersão, dos 100 coletores com aspersores não compensantes a 1,5 m de altura (CUENC1,5 m).

Em geral, os coletores dispostos no centro tenderiam a apresentar uma média acima dos dispostos nas laterais da área irrigada, mas isto não é uma regra geral, pois a velocidade e direção do vento têm influência no local em que os coletores recebem água dos quatro aspersores.

Os coeficientes de variação dos 100 coletores ficaram abaixo de 7,64%, nos ensaios com aspersores compensantes a 1,0 m e 1,5 m de altura e aspersores não compensantes a 1,0 m e 1,5 m de altura, portanto apresentam homogeneidade nas lâminas coletadas nos 32 ensaios realizados (GOMES, 1987). Como foi observado pelos valores de máximo e mínimo, os coletores apresentaram uma grande variabilidade de valores, não importando a localização dos coletores, isto mostra que a direção e velocidade do vento influenciaram muito durante a realização dos ensaios.

4.4 Análise estatística das variáveis CUC, CUD e CUE das lâminas de água de irrigação por aspersão, dos 32 ensaios com aspersores compensantes e não compensantes a 1,0 e 1,5 m de altura

Nesta seção são calculados os índices CUC, CUD e CUE, para cada um dos 32 ensaios, considerando 100 repetições em cada ensaio, para os aspersores compensantes e não compensantes a 1,0 e 1,5 m de altura. Estes dados não são espacializados, consequentemente não foram construídos mapas temáticos.

Nas tabelas 10 e 11, apresentam-se os dados da estatística descritiva. Foram calculados: média, desvio-padrão, coeficiente de variação, 1º quartil, 3º quartil, mediane, variância, coeficiente assimetria, coeficiente curtose e valores máximo e mínimo para o CUC, CUD e CUE, com a utilização dos aspersores compensantes e não compensantes a 1,0 e 1,5 m de altura. Ao longo do experimento, os valores máximos, nos 32 ensaios, para o CUC-C1,0 m, foi de 93,08%, para o CUC-C1,5 m foi de 94,10%, para o CUC-NC1,0 m foi de 91,04% e para o CUC-NC1,5 m foi de 91,92%; os valores mínimos nos 32 ensaios foram: para o CUC-C1,0 m de 78,83%, para o CUC-C1,5 m de 82,61%, para o CUC-NC1,0 m de 70,45% e para o CUCNC1,5 m de 73,55%. Os valores de CUC médios foram: para o CUC-C1,0 m de 86,28%, para o CUC-C1,5 m de 87,51%, para o CUC-NC1,0 m de 84,56% e para o CUC-NC1,5 m de 85,50%.

Souza, Souza e Vilas Boas (2008), estudando o desempenho de um sistema de irrigação por aspersão convencional em vila rural, em função dos fatores agrometereológicos, obtiveram valores de uniformidade abaixo do mínimo aceitável, de 80%, obtendo um CUC médio de 77,9%. O que não ocorreu com este trabalho, pois o

menor valor médio de CUC foi para o CUC-NC1,0 m: 84,56% e o maior valor médio de CUC foi para o CUC-C1,5 m: 87,51%.

Justi, Vilas Boas e Sampaio (2010) observaram em seu estudo, na aplicação de água com a utilização de dois aspersores marca Naandan, modelo Super 10, não compensantes, bocal azul, que houve tendência do CUC em diminuir com o aumento da velocidade do vento. Obtiveram CUC mínimo, médio e máximo de: 79,72%, 72,25% e 89,45%, respectivamente.

Segundo o catalogo técnico, tabela de desempenho do fabricante dos aspersores Super 10, bocal azul, Naandan, utilizado neste estudo, e no espaçamento de 10 x 10 m, a 3,5 bar de pressão os aspersores compensantes apontam para um CUC entre 89-92% e para os aspersores não compensantes um CUC maior que 93%, o que não ocorreu neste estudo, pois se alcançou a média nos aspersores compensantes para o CUC-C1,0 m de 86,28% e para o CUC-C1,5 m de 87,51% e nos aspersores não compensantes para o CUC-NC1,0 m de 84,56% e para o CUC-NC1,5 m de 85,50%, mas se comprovou que os aspersores compensantes, realmente, têm uma uniformidade melhor que os aspersores não compensantes e também que o fator vento é um fator que prejudica todos os coeficentes de uniformidade de distribuição de água na irrigação por aspersão.

Dechmi *et al*. (2003) observaram em seu estudo de espaçamento na aplicação de água por aspersão no milho, que a uniformidade, em 48% dos ensaios, foi menor que o aceitável, sendo que os valores extremos de uniformidade corresponderam aos maiores e menores valores de velocidade do vento.

Também Azevedo *et al*. (2000), estudando a influência de fatores climáticos em sistemas por aspersão de alta pressão, relataram que, quando a velocidade do vento aumentou de 1 para 7 m s^{-1}, o CUC caiu de 83 para 42%, ou seja, 50% menos de uniformidade com o aumento da velocidade do vento. Já, Playán *et al*. (2006), estudando a uniformidade de distribuição de água, usando modelos balísticos e utilizando três modelos de aspersores, verificaram que, em todos os casos, com o aumento da velocidade do vento a uniformidade foi afetada sensivelmente.

Finalmente, pode-se observar que existe pouca dispersão e homogeneidade nos coeficientes de uniformidade CUC, CUD e CUE, quando se trabalha com os aspersores compensantes e não compensantes a 1,0 e 1,5 m de altura.

Tabela 10 Análise exploratória das variáveis CUC, CUD, CUE da lâmina de água de irrigação, dos 32 ensaios com aspersores compensantes a 1,0 e 1,5 m de altura

Variáveis	CUC-C1,0 m	CUD-C1,0 m	CUE-C1,0 m	CUC-C1,5 m	CUD-C1,5 m	CUE-C1,5 m
Tamanho Amostra	32	32	32	32	32	32
Média	86,28	78,74	81,90	87,51	81,66	83,84
DP	4,27	6,15	5,33	2,48	3,64	2,88
Variância	18,24	37,85	28,37	6,15	13,25	8,30
CV %	4,95	7,81	6,50	2,83	4,46	3,43
Min	78,83	68,24	68,12	82,61	73,30	77,86
Q1	82,18	73,14	77,48	86,02	79,33	81,77
Mediana	86,43	79,20	83,04	87,48	81,51	83,57
Q3	90,41	84,37	85,82	89,20	85,15	86,04
Max	93,08	87,65	89,20	94,10	88,27	89,83
Coef. Assimetria	0,00	-0,20	-0,6	0,24	-0,17	-0,07
Coef. Curtose	-1,27	-1,27	-0,21	0,65	-0,47	-0,37

Notas: Q_1: primeiro quartil; Q_3: terceiro quartil; CV: coeficiente de variação; DP: Desvio padrão; CUC-C1,0 m: Coeficiente de Uniformidade de Christiansen com aspersor compensante a 1,0 m de altura; CUD-C1,0 m: Coeficiente de Uniformidade de Distribuição com aspersor compensante a 1,0 m de altura; CUE-C1,0 m: Coeficiente Estatístico de Uniformidade com aspersor compensante a 1,0 m de altura; CUC-C1,5 m: Coeficiente de Uniformidade de Christiansen com aspersor compensante a 1,5 m de altura; CUD-C1,5 m: Coeficiente de Uniformidade de Distribuição com aspersor compensante a 1,5 m de altura; CUE-C1,5 m: Coeficiente Estatístico de Uniformidade com aspersor compensante a 1,5 m de altura.

Tabela 11 Análise exploratória das variáveis CUC, CUD, CUE da lâmina de água de irrigação por aspersão, dos 32 ensaios com aspersores não compensantes a 1,0 e 1,5 m de altura

Variáveis	CUC-NC1,0 m	CUD-NC1,0 m	CUE-NC1,0 m	CUC-NC1,5 m	CUD-NC1,5 m	CUE-NC1,5 m
Tamanho Amostra	32	32	32	32	32	32
Média	84,56	75,36	80,74	85,5	78,84	81,93
DP	4,16	5,82	4,81	3,97	6,08	5,31
Variância	17,28	33,88	23,14	15,76	36,98	28,18
CV %	4,92	7,72	5,96	4,64	7,71	6,48
Min	75,77	63,86	70,82	78,54	68,24	68,12
Q1	81,72	71,49	77,62	82,46	73,14	77,48
Mediana	84,87	74,53	81,15	86,31	79,2	83,04
Q3	88,28	81,02	85,26	88,06	84,37	85,82
Max	91,04	86,56	88,11	91,92	87,65	89,20
Coef. Assimetria	-0,51	-0,02	-0,39	-0,26	-0,23	-0,61
Coef. Curtose	-0,53	-0,71	-0,74	-0,76	-1,21	-0,17

Notas: Q_1: primeiro quartil; Q_3: terceiro quartil; CV: coeficiente de variação; DP: Desvio padrão; CUC-NC1,0 m: Coeficiente de Uniformidade de Christiansen com aspersor não compensante a 1,0 m de altura; CUD-NC1,0 m: Coeficiente de Uniformidade de Distribuição com aspersor não compensante a 1,0 m de altura; CUE-NC1,0 m: Coeficiente Estatístico de Uniformidade com aspersor não compensante a 1,0 m de altura; CUC-NC1,5 m: Coeficiente de Uniformidade de Christiansen com aspersor não compensante a 1,5 m de altura; CUD-NC1,5 m: Coeficiente de Uniformidade de Distribuição com aspersor não compensante a 1,5 m de altura; CUE-NC1,5 m: Coeficiente Estatístico de Uniformidade com aspersor não compensante a 1,5 m de altura.

A uniformidade de distribuição foi determinada pelo CUC, CUD e CUE. Nas tabelas 12, 13, 14 e 15 são apresentados os valores obtidos nos 32 ensaios, com os aspersores compensantes e não compensantes a 1,0 e 1,5 m de altura.

Foram calculadas as regressões múltiplas entre os coeficientes de uniformidade de irrigação por aspersão e o que apresentou melhor coeficiente de determinação (R^2) foi o realizado com aspersores não compensantes a 1,0 m de altura: R^2 de 96,90%, seguido dos aspersores compensantes a 1,5 de altura: R^2 de 94,10%, indicando a forte correlação entre as variáveis, e que se pode utilizar esta equação no dimensionamento e ajuste dos sistemas de irrigação por aspersão para a marca e modelo ensaiado.

Tabela 12 Valores do Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC), Coeficiente de Uniformidade de Distribuição (CUD) e Coeficiente Estatístico de Uniformidade (CUE), obtidos nos 32 ensaios com aspersores compensantes a 1,0 m de altura

Testes	CUC (%)	CUD (%)	CUE (%)	Velocidade vento (V)
1	86,19	86,60	85,82	0,91
2	92,18	86,42	88,96	2,09
3	82,07	80,93	84,02	0,77
4	90,64	85,25	87,76	2,84
5	86,19	86,60	85,82	3,56
6	88,57	82,76	85,75	3,86
7	82,34	77,09	78,83	2,60
8	79,45	70,56	75,11	3,77
9	85,81	80,91	82,59	3,73
10	87,06	82,98	85,67	3,23
11	87,85	86,12	88,44	0,93
12	92,41	83,21	86,16	0,94
13	90,91	74,29	79,78	2,94
14	86,81	71,75	75,75	1,09
15	83,56	69,22	73,04	2,94
16	82,13	69,04	76,79	1,80
17	81,71	74,63	77,41	3,69
18	89,33	72,28	77,66	0,77
19	89,71	78,76	84,01	0,36
20	81,31	73,11	77,06	3,66
21	93,08	80,86	85,46	1,16
22	90,88	84,75	87,18	0,00
23	81,69	76,79	80,67	3,57
24	92,21	73,22	80,74	2,60
25	80,79	79,23	82,68	0,49
26	88,57	79,17	83,90	4,19
27	83,23	70,29	74,51	2,21
28	91,94	86,82	88,87	0,00
29	78,83	68,24	68,12	4,14
30	83,08	82,49	83,40	2,06
31	86,67	87,65	89,20	2,06
32	83,74	77,70	79,79	2,57
média	86,28	78,74	81,90	2,23
Regressão: CUC = 35,7 - 0,774 CUD + 1,36 CUE e R^2 = 53,00%				

Tabela 13 Valores do Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC), Coeficiente de Uniformidade de Distribuição (CUD) e Coeficiente Estatístico de Uniformidade (CUE), obtidos nos 32 ensaios com aspersores compensantes a 1,5 m de altura

Testes	CUC (%)	CUD (%)	CUE (%)	Velocidade vento (V)
1	90,72	85,56	87,67	3,73
2	91,18	85,47	88,26	0,93
3	89,31	80,97	86,19	0,80
4	88,13	86,12	84,95	0,81
5	94,10	88,26	89,83	2,94
6	90,72	85,56	87,67	2,53
7	88,90	82,98	85,24	1,21
8	89,30	81,47	85,33	1,17
9	87,44	83,33	84,37	2,01
10	87,97	87,66	85,60	2,46
11	87,03	81,43	83,66	2,94
12	86,06	77,45	81,95	3,91
13	82,61	73,30	79,06	2,90
14	86,20	77,12	80,68	2,84
15	86,00	82,45	81,85	2,90
16	85,73	77,33	81,51	1,79
17	88,74	84,20	86,45	2,54
18	90,05	85,74	86,86	1,03
19	88,69	80,62	85,47	3,06
20	86,76	81,59	83,34	3,13
21	86,24	79,33	83,48	1,57
22	87,53	80,81	83,47	1,89
23	87,34	80,00	82,63	1,06
24	89,60	86,25	86,84	3,97
25	86,69	81,55	82,42	4,67
26	85,33	76,08	81,75	1,49
27	87,65	83,57	83,41	1,94
28	83,55	79,33	78,65	2,33
29	87,52	82,65	83,76	2,17
30	82,73	77,77	77,86	1,97
31	85,55	77,13	81,07	2,23
32	84,88	80,11	81,46	0,16
média	87,51	81,66	83,84	2,22
Regressão: CUC = 17,5 + 0,0047 CUD + 0,83 CUE e R^2 =94,10%				

Tabela 14 Valores do Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC), Coeficiente de Uniformidade de Distribuição (CUD) e Coeficiente Estatístico de Uniformidade (CUE), obtidos nos 32 ensaios com aspersores não compensantes a 1,0 m de altura

Testes	CUC (%)	CUD (%)	CUE (%)	Velocidade vento (V)
1	85,94	77,10	82,54	0,91
2	83,31	70,83	78,99	2,09
3	91,04	83,93	88,11	0,77
4	84,71	74,38	81,46	2,84
5	79,86	68,85	74,79	3,56
6	82,03	72,66	78,15	3,37
7	83,95	74,27	80,30	1,97
8	81,47	72,17	77,94	3,73
9	81,62	71,26	76,22	3,23
10	88,53	83,00	86,55	0,93
11	89,84	82,73	86,68	0,94
12	85,31	75,58	82,01	2,94
13	90,12	82,08	86,63	1,09
14	83,28	74,55	80,04	2,94
15	88,70	81,22	86,11	0,46
16	82,36	68,35	77,51	0,56
17	84,67	72,48	78,76	2,47
18	86,00	77,96	82,67	2,39
19	77,74	73,17	75,52	2,81
20	86,16	74,99	82,25	2,03
21	75,99	63,86	70,82	1,99
22	85,03	73,00	79,55	1,46
23	75,77	64,76	71,20	4,49
24	79,20	67,88	73,78	4,61
25	79,22	68,54	73,98	2,64
26	88,30	82,07	85,69	2,07
27	87,74	77,97	84,70	1,79
28	84,33	74,52	80,83	1,77
29	87,85	78,23	83,05	2,10
30	88,68	82,28	85,36	0,00
31	88,97	86,56	86,53	0,00
32	88,24	80,42	84,97	0,00
média	84,56	75,36	80,74	2,03
Regressão: CUC = 12,6 - 0,186 CUD + 1,07 CUE e R^2 = 96,90%				

Tabela 15 Valores do Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC), Coeficiente de Uniformidade de Distribuição (CUD) e Coeficiente Estatístico de Uniformidade (CUE), obtidos nos ensaios com aspersores não compensantes a 1,5 m de altura

Testes	CUC (%)	CUD (%)	CUE (%)	Velocidade vento (V)
1	86,78	86,60	85,82	3,73
2	88,77	86,42	88,96	0,93
3	91,50	80,93	84,02	0,80
4	86,42	85,25	87,76	0,81
5	86,70	86,60	85,82	2,94
6	85,76	82,76	85,75	2,53
7	87,19	77,09	78,83	1,21
8	88,28	70,56	75,11	1,17
9	85,95	80,91	82,59	2,01
10	84,17	82,98	85,67	2,46
11	82,27	86,12	88,44	2,94
12	78,80	83,21	86,16	3,91
13	78,54	69,22	73,04	2,90
14	87,41	69,04	76,79	2,84
15	86,27	74,63	77,41	1,79
16	91,12	72,28	77,66	2,54
17	78,95	78,76	84,01	1,03
18	79,67	73,11	77,06	3,06
19	87,43	80,86	85,46	3,13
20	91,92	84,75	87,18	1,57
21	90,96	76,79	80,67	1,89
22	83,04	73,22	80,74	1,06
23	79,93	79,23	82,68	3,97
24	79,76	79,17	83,90	4,67
25	85,95	70,29	74,51	4,61
26	81,51	86,82	88,87	1,94
27	83,98	68,24	68,12	2,33
28	86,54	75,51	79,70	2,17
29	86,35	73,06	76,10	1,97
30	84,37	82,49	83,40	2,23
31	91,39	87,65	89,20	0,00
32	88,33	78,42	80,31	0,16
média	90,25	79,27	82,88	2,23
Regressão: CUC = 82,7 + 0,211 CUD - 0,168 CUE e R^2 = 1,70%				

4.4.1 Cartas de controle X Individual e AM (amplitude móvel) para o CUC, CUD e CUE da irrigação por aspersão, dos 32 ensaios com aspersores compensantes e não compensantes a 1,0 e 1,5 m de altura

Nas figuras 70 a 81, visualiza-se o comportamento do sistema de irrigação estudado, ao longo dos 32 ensaios realizados. Verifica-se que um ensaio da variável CUC-C1,5 m (Figura 73) tem um ponto fora do limite superior de controle e o estudo da variável CUE-C1,5 m (Figura 75) também tem um ponto fora do limite superior de controle e

um ponto fora do limite inferior de controle, indicando que ambas as variáveis estão fora de controle estatístico. Também se pode observar que nenhum dos ensaios obteve CUC menor que o limite inferior de controle e nem maior que o limite superior de controle. O que se observou, durante todos os 32 ensaios, foi uma grande variação de todos os índices de uniformidade CUC, CUD e CUE, em relação ao valor médio. Indicando que todos os processos excessão do CUC-C1,5 m e CUE-C1,5 m estão sobre controle estatístico.

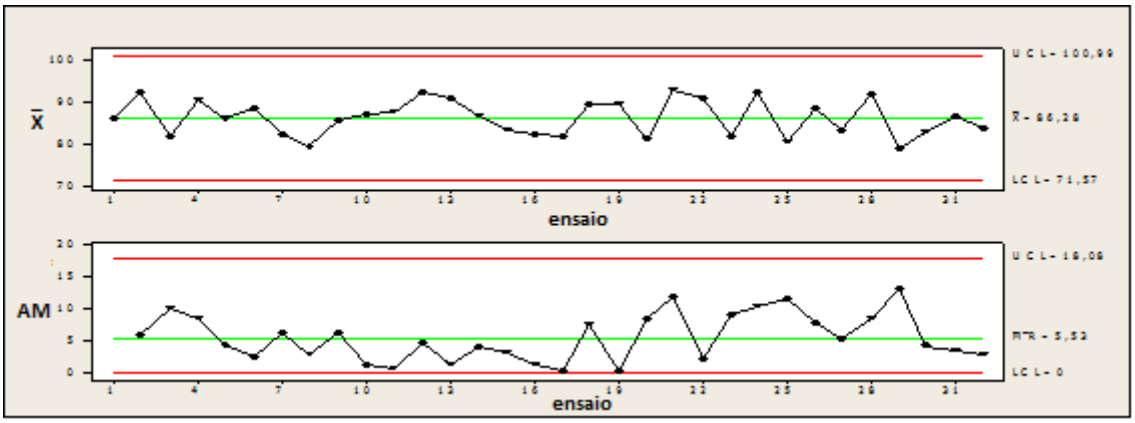

Figura 70 Carta de controle da média individual e AM (amplitude móvel), para o CUC da irrigação por aspersão dos 32 ensaios, com aspersores compensantes a 1,0 m de altura (CUC-C1,0 m).

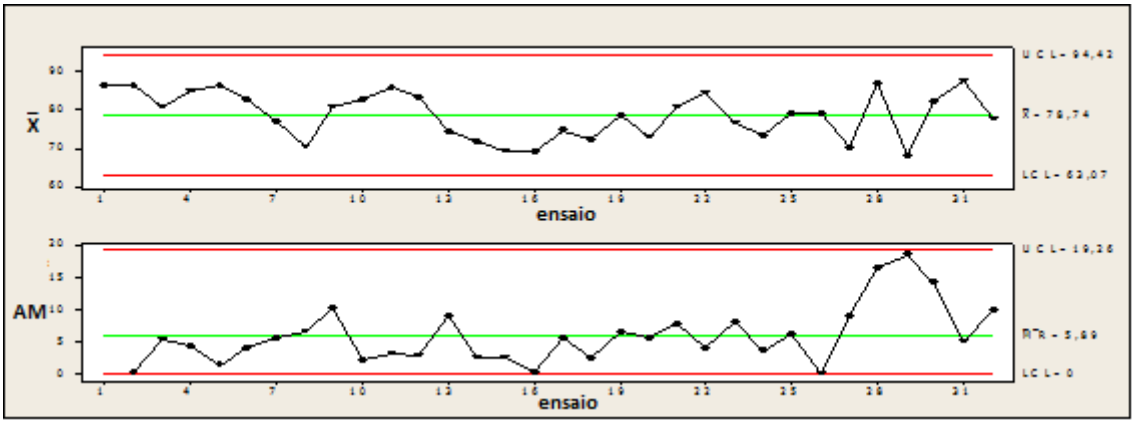

Figura 71 Carta de controle da média individual e AM (amplitude móvel), para o CUD da irrigação por aspersão dos 32 ensaios, com aspersores compensantes a 1,0 m de altura (CUD-C1,0 m).

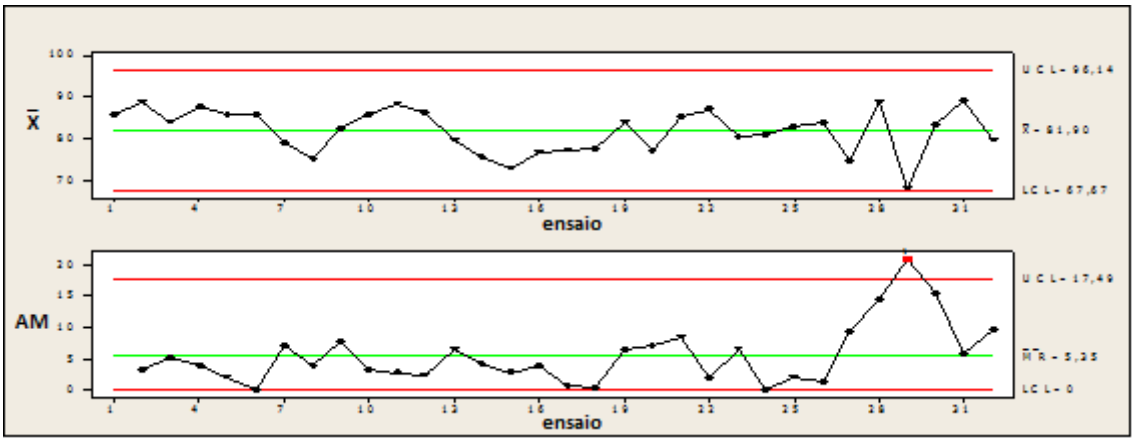

Figura 72 Carta de controle da média individual e AM (amplitude móvel), para o CUE da irrigação por aspersão dos 32 ensaios, com aspersores compensantes a 1,0 m de altura (CUE-C1,0 m),

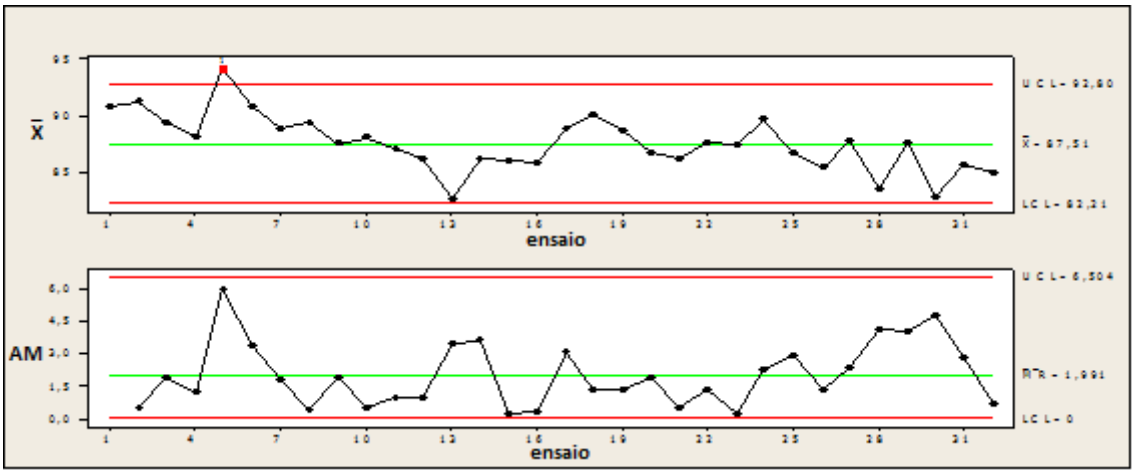

Figura 73 Carta de controle da média individual e AM (amplitude móvel), para o CUC da irrigação por aspersão dos 32 ensaios, com aspersores compensantes a 1,5 m de altura (CUC-C1,5 m)

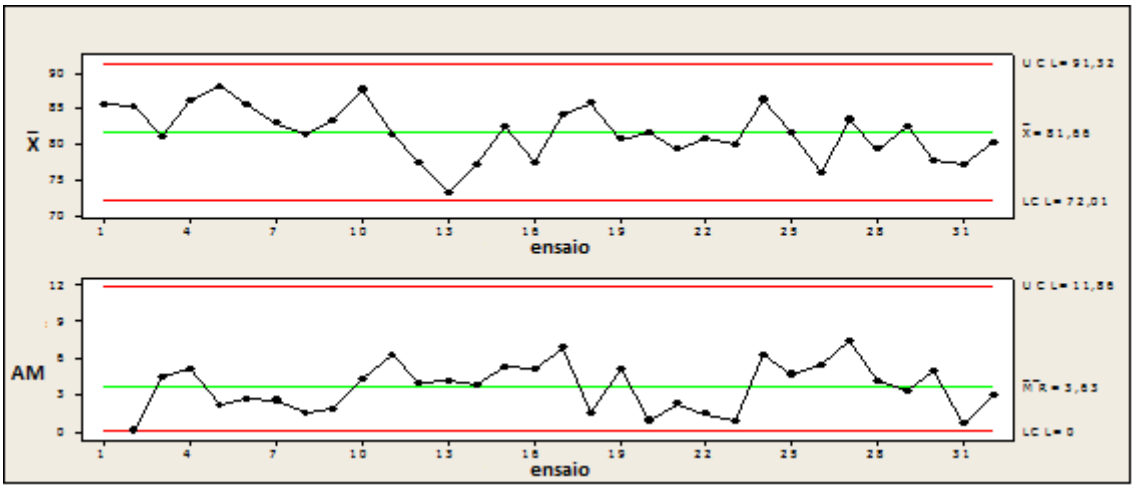

Figura 74 Carta de controle da média individual e AM (amplitude móvel), para o CUD da irrigação por aspersão dos 32 ensaios, com aspersores compensantes a 1,5 m de altura (CUD-C1,5 m).

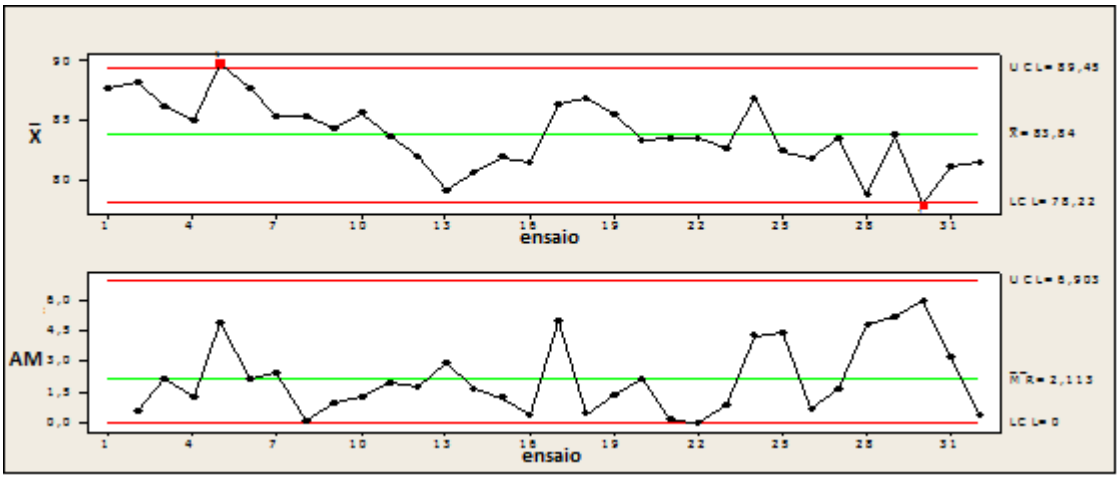

Figura 75 Carta de controle da média individual e AM (amplitude móvel), para o CUE da irrigação por aspersão dos 32 ensaios, com aspersores compensantes a 1,5 m de altura (CUE-C1,5 m).

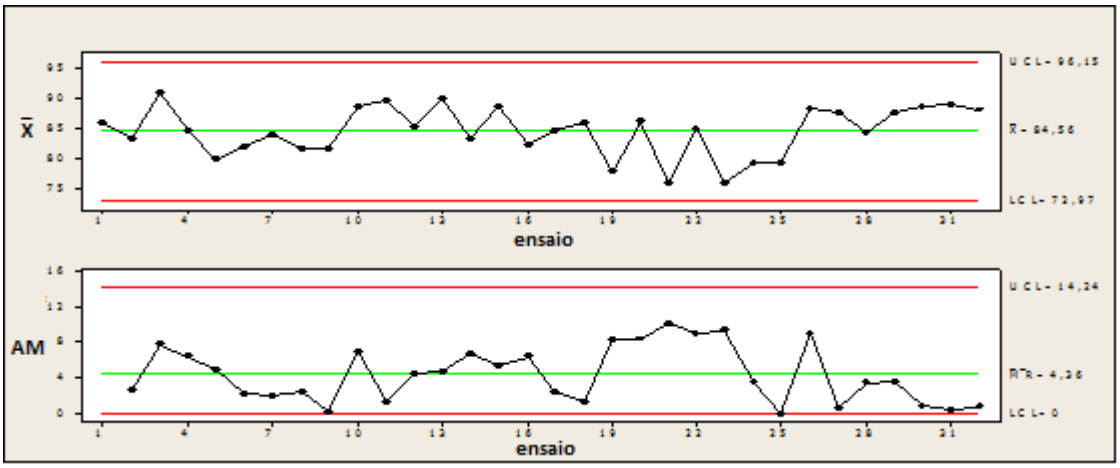

Figura 76 Carta de controle da média individual e AM (amplitude móvel), para o CUC da irrigação por aspersão dos 32 ensaios, com aspersores não compensantes a 1,0 m de altura (CUC-NC1,0 m).

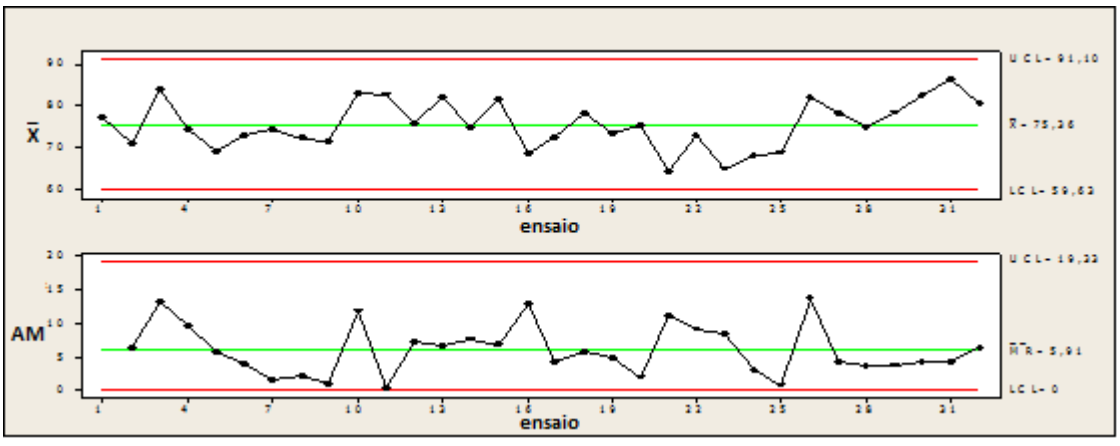

Figura 77 Carta de controle da média individual e AM (amplitude móvel), para o CUD da irrigação por aspersão dos 32 ensaios, com aspersores não compensantes a 1,0 m de altura (CUD-NC1,0 m).

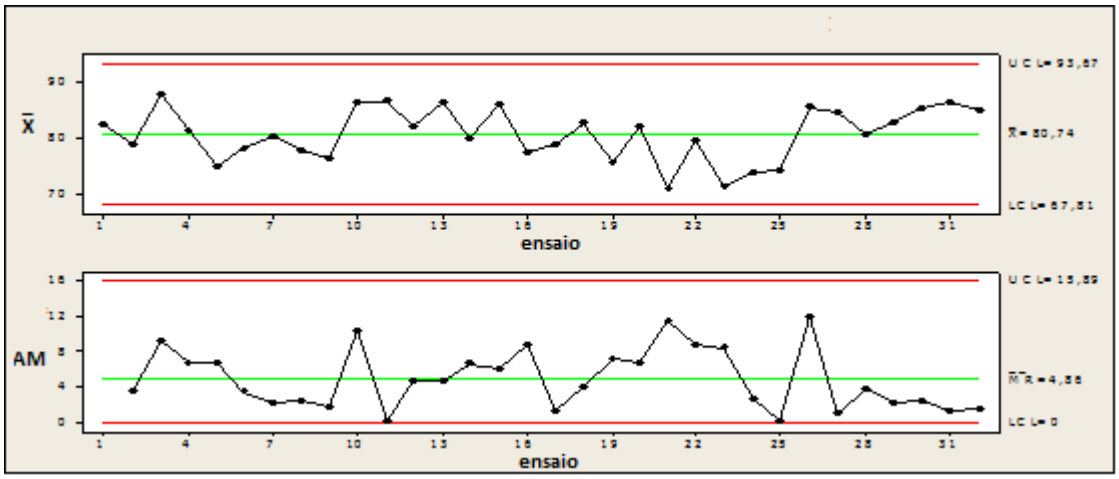

Figura 78 Carta de controle da média individual e AM (amplitude móvel), para o CUE da irrigação por aspersão dos 32 ensaios, com aspersores não compensantes a 1,0 m de altura (CUE-NC1,0 m).

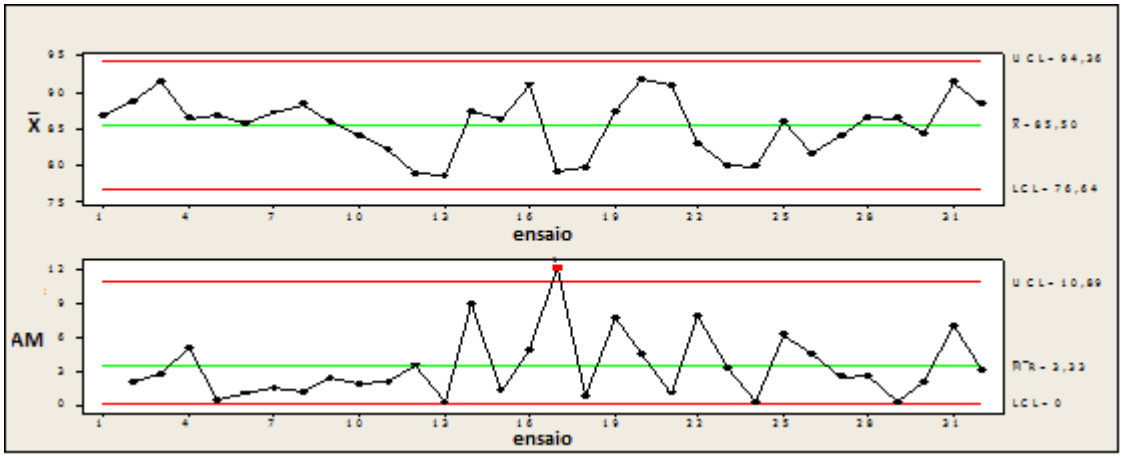

Figura 79 Carta de controle da média individual e AM (amplitude móvel), para o CUC da irrigação dos 32 ensaios, com aspersores não compensantes a 1,5 m de altura (CUC-NC1,5 m)

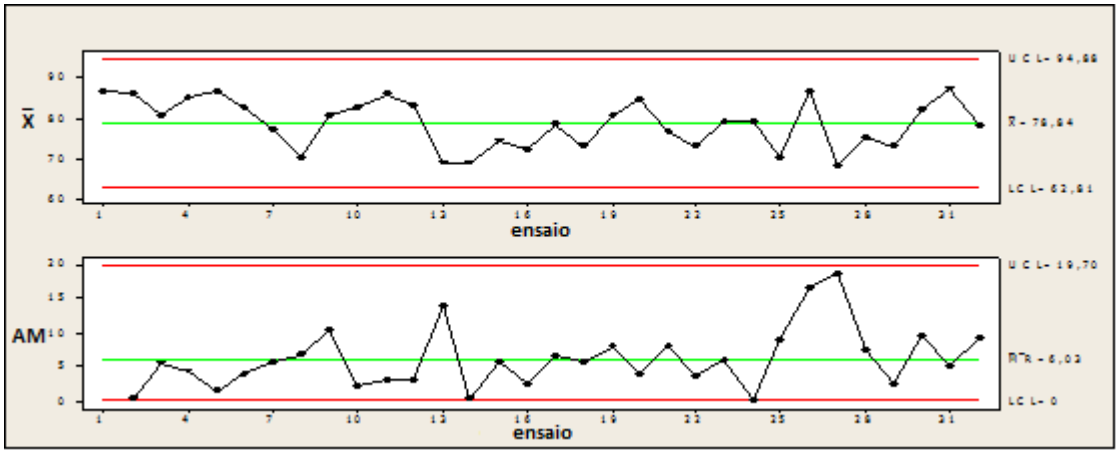

Figura 80 Carta de controle da média individual e AM (amplitude móvel), para o CUD da irrigação dos 32 ensaios, com aspersores não compensantes a 1,5 m de altura (CUD-NC1,5 m).

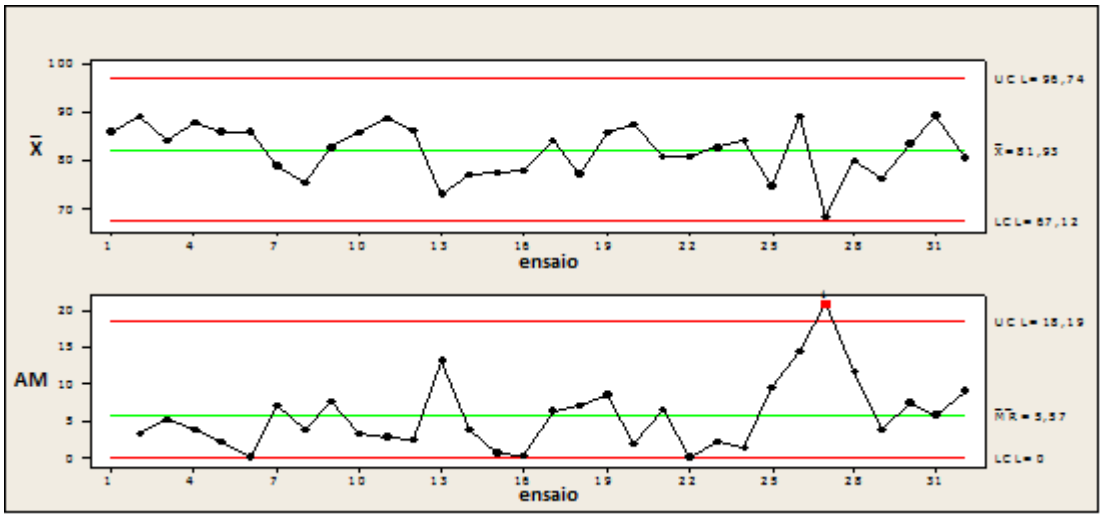

Figura 81 Carta de controle da média individual e AM (amplitude móvel), para o CUE da irrigação dos 32 ensaios, com aspersores não compensantes a 1,5 m de altura (CUE-NC1,5 m)

4.4.2 Valores dos índices de capacidade o processo C_p e C_{pk}

Foram calculados os valores dos índices de capacidade do processo de C_p e C_{pk}, independente de estarem dentro ou fora dos limites de controle estatístico, pois, segundo Zocoler (2005), estima-se que, em sistemas por gotejamento, o ideal é que a uniformidade atinja um valor de CUC superior a 90% e CUD entre 85 e 90%, e, de acordo com Pereira (2001), os sistemas de irrigação por aspersão mais adequados são, geralmente, aqueles que apresentam alta uniformidade de distribuição, ou seja, CUC superior a 80%.

Verificou-se que os aspersores compensantes e não compensantes a 1,5 m de altura tiveram um CUC melhor que os aspersores compensantes e não compensantes a 1,0 m de altura. Isso demonstra que a altura sendo maior a distribuição de água é melhor, independente da variação e velocidade do vento.

Em todas as variáveis estudadas, segundo Montgomery (2004), tem-se que $C_{pk} < C_p$, o que implica que os processos estão fora do ponto de especificação. A distribuição está centrada, mas há uma variação maior que a faixa dos limites de especificação.

Tabela 16 Valores calculados de índices de capacidade de processo (C_p) e índices de desempenho de processo (C_{pk}), para os 32 ensaios dos aspersores compensantes e não compensantes a 1,0 e 1,5 m de altura

Tipo de Coeficiente	Controle Estatístico	Valores Médios 32 ensaios	C_p	Potencial do Processo	C_{pk}	Desempenho Processo
CUC-C1,0 m	Dentro	86,28%	0,68	Incapaz	0,43	pfpe
CUC-C1,5 m	Fora	87,51%	(1,89)	Capaz	(1,42)	pfpe
CUC-NC1,0 m	Dentro	84,56%	0,86	Incapaz	0,39	pfpe
CUC-NC1,5 m	Fora	90,25%	(1,13)	Aceitável	(0,62)	pfpe
CUD-C1,0 m	Dentro	78,74%	0,64	Incapaz	-0,80	pfpe
CUD-C1,5 m	Dentro	81,66%	1,04	Aceitável	0,17	pfpe
CUD-NC1,0 m	Dentro	75,36%	0,64	Incapaz	-0,29	pfpe
CUD-NC1,5 m	Dentro	79,27%	0,62	Incapaz	-0,07	pfpe
CUE-C1,0 m	Dentro	81,90%	0,88	Incapaz	0,48	pfpe
CUE-C1,5 m	Dentro	83,83%	2,23	Capaz	1,58	pfpe
CUE-NC1,0 m	Dentro	80,74%	0,97	Incapaz	0,44	pfpe
CUE-NC1,5 m	Dentro	82,88%	0,84	Incapaz	0,47	pfpe

Notas: C_p: potencial do processo; C_{pk}: desempenho do processo; pfpe: processo fora do ponto de especificação; CUC-C1,0 m: Coeficiente de Uniformidade de Christiansen com aspersor compensante a 1,0 m de altura; CUC-C1,5 m: Coeficiente de Uniformidade de Christiansen com aspersor compensante a 1,5 m de altura; CUC-NC1,0 m: Coeficiente de Uniformidade de Christiansen com aspersor não compensante a 1,0 m de altura; CUC-NC1,5 m: Coeficiente de Uniformidade de Christiansen com aspersor não compensante a 1,5 m de altura; CUD-C1,0 m: Coeficiente de Uniformidade de Distribuição com aspersor compensante a 1,0 m de altura; CUD-C1,5 m: Coeficiente de Uniformidade de Distribuição com aspersor compensante a 1,5 m de altura; CUD-NC1,0 m: Coeficiente de Uniformidade de Distribuição com aspersor não compensante a 1,0 m de altura; CUD-NC1,5 m: Coeficiente de Uniformidade de Distribuição com aspersor não compensante a 1,5 m de altura; CUE-C1,0 m: Coeficiente Estatístico de Uniformidade com aspersor compensante a 1,0 m de altura; CUE-C1,5 m: Coeficiente Estatístico de Uniformidade com aspersor compensante a 1,5 m de altura; CUE-NC1,0 m: Coeficiente Estatístico de Uniformidade com aspersor não compensante a 1,0 m de altura; CUE-NC1,5 m: Coeficiente Estatístico de Uniformidade com aspersor não compensante a 1,5 m de altura.

Finalmente, ajustaram-se modelos de regressão linear do coeficiente de uniformidade CUC, com os aspersores compensantes e não compensantes a 1,0 m e 1,5 m de altura, em função da velocidade do vento, tendo coeficientes de determinação abaixo de 53%, como apresentado na Tabela 17. Estes modelos expressam pouca representatividade dos coeficientes de uniformidade, em função da velocidade do vento.

Tabela 17 Modelos de regressão linear dos coeficientes de uniformidade CUC, com aspersores compensantes e não compensantes a 1,0 e 1,5 m de altura, em função da velocidade do vento (CUC = $\hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 v$)

Coeficiente de uniformidade	Coeficiente do modelo $\hat{\beta}_0$	$\hat{\beta}_1$	Coeficiente de determinação R^2	R^{2*}	Desvio padrão S
CUC-C1,0 m	89,06	-1,24	14,70%	11,90%	4,01
CUC-C1,5 m	87,50	0,004	0%	0%	2,52
CUC-NC1,0 m	89,45	-2.41	52,40%	50,80%	2,91
CUC-NC1,5 m	89,09	-1,61	23,50%	21,00%	3,53

Notas: $\hat{\beta}_0$: estimativa do coeficiente linear; $\hat{\beta}_1$; estimativa do coeficiente linear; R^2:coeficiente de determinação; R^{2*}: coeficiente de determinação corrigido; S: desvio padrão do modelo.

Verificou-se que a velocidade do vento afeta de forma inversamente proporcional o coeficiente de uniformidade CUC-NC1,0 m, conforme apresentado na Figura 82. Resultados similares foram obtidos por PLAYÁN *et al*. (2006).

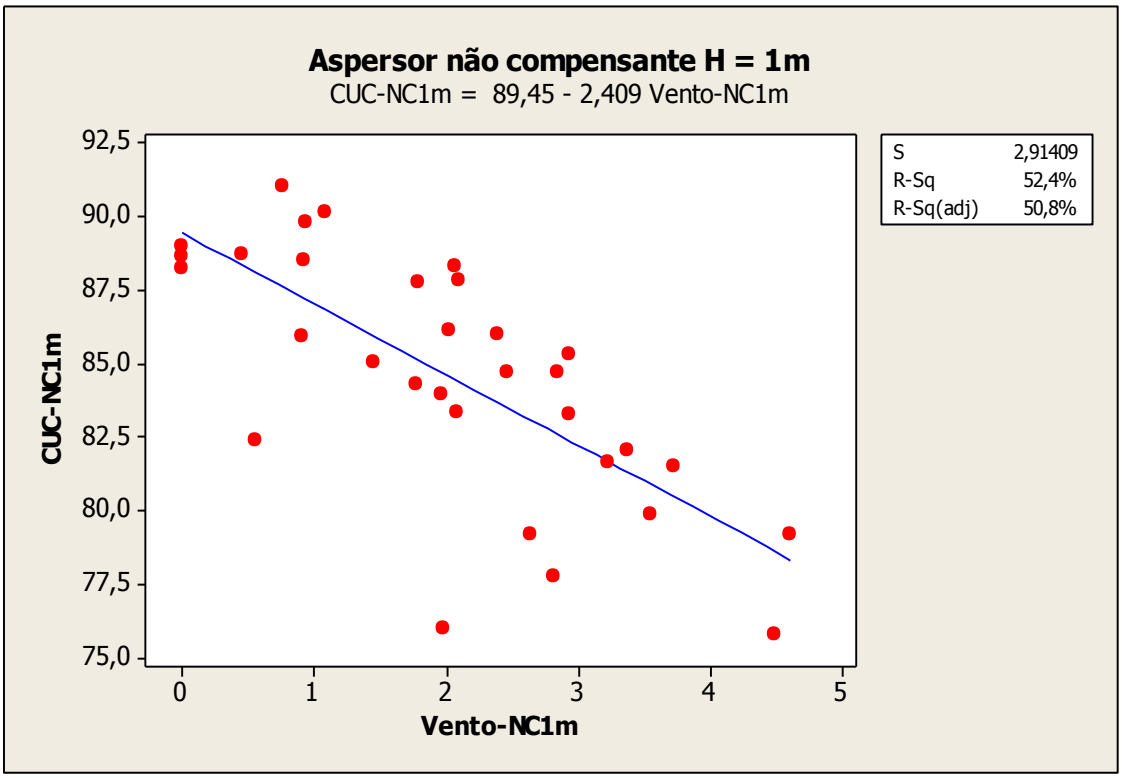

Figura 82 Modelo de regressão linear do CUC-NC1,0 m, em função da velocidade do vento (V).

5 CONCLUSÕES

Considerando-se os objetivos propostos e os resultados obtidos por esta pesquisa, pode-se concluir que:

- O índice de capacidade de processo foi diretamente proporcional ao aumento do coeficiente de uniformidade de distribuição.
- A variável vento teve uma influência direta nos valores do coeficiente de uniformidade.
- O CUC médio das lâminas médias de água, na irrigação por aspersão dos 100 coletores, foi maior com aspersores compensantes que com aspersores não compensantes.
- O CUC médio dos 32 ensaios, na irrigação por aspersão dos 100 coletores com aspersores não compensantes a 1,5 m, foi o que forneceu o melhor índice, confirmando que na altura de 1,5 m os coeficientes de uniformidade são melhores, independentemente da variável vento.
- Pelo estudo realizado nos 32 ensaios, na irrigação por aspersão para o Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC) foi comprovado que os aspersores compensantes, na pressão de 3,5 bar, têm uma uniformidade melhor que os aspersores não compensantes.
- Existe variabilidade espacial alta e moderada nas lâminas médias de água, na irrigação por aspersão com aspersores compensantes a 1,5 m de altura e aspersores não compensantes a 1,0 e 1,5 m de altura.
- Na análise geral dos coeficientes CUC, CUD e CUE das lâminas médias de água, na irrigação por aspersão nos 100 coletores, predominou o ajuste dos modelos gaussiano por WLS1.
- Na confecção dos mapas temáticos CUC-C1,0 m, CUD-C1,0 m e CUE-C1,0 m, nos 100 coletores, para os 32 ensaios realizados, observou-se que tiveram uma uniformidade localizada, enquanto todos os outros apresentaram uma variabilidade na distribuição dos coeficientes de uniformidade, isto evidencia que as variáveis climáticas e a altura dos aspersores afetam os coeficientes de uniformidade na irrigação por aspersão.
- Existe variabilidade espacial alta e moderada nos coeficientes de uniformidade CUC, CUD e CUE, na irrigação por aspersão, com uso de aspersores compensantes a 1,5 m de altura e não compesante a 1,0 e 1,5 m de altura.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 7749-2**. Equipamentos de irrigação agrícola - Aspersores rotativos. Parte 2: Uniformidade de distribuição e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, jan. 2000. 6 p.

AZEVEDO, J. H.; BERNARDO, S.; RAMOS, M. M.; SEDIYAMA, G. C.; CECON, P. R. Influência de fatores climáticos e operacionais sobre a uniformidade de distribuição de água, em um sistema de irrigação por aspersão de alta pressão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 4, n. 2, p. 152-158, 2000.

BARTH, F.T.; BARBOSA, W.E.S. **Recursos hídricos.** São Paulo, 1999. Disponível em http://www.fcth.br/public/cursos/phd5028.html. Acesso em 18 fev. 2010.

BERNARDO, S. **Manual de irrigação**. 6 ed. ver. e ampl. Viçosa: UFV, Imprensa Universitária, 1995. 657 p.

BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E.C. **Irrigação princípios e métodos**. 2 ed. Viçosa: Imprensa Universitária, 2007. 358p.

BORSSOI, J. A.; URIBE-OPAZO, M. A.; GALEA, M. Diagnostics tecniques applied in geoestatistics for agricultural data analysis. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa-MG, v. 6, n. 6, p. 1-16, 2009.

BRENNAN, M. S.; NARASIMHA, M.; HOLTHAM, P. N.; Multiphase modelling of hydrocyclones. Prediction of cut-size. **Minerals Engineering**, v. 20, p. 395-406, 2007.

BURGESS, T. M.; WEBSTER, R. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties. I. The semivariograma and principal kriging. **The Journal Soil Science**, Oxford. v. 31, 2. ed. p. 315-331, 1980.

CAHN, M. D.; HUMMEL, J. W.; BROUER, B. H. Spatial analysis of fertility for site-specific crop management. **Soil Science Society of America Journal**, v. 58, n. 4, p. 1240-1248, 1994.

CAMBARDELLA, C. A.; MOORMAN, T. B.; NOVAK, J. M.; PARKIN, T. B.; KARLEN, D. L.; TURCO, R. F.; KONOPKA, A. E. Fieldscale variability of soil properties in Central Iowa soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 58, p. 1501-1511, 1994.

CASTRO, N. **Apostila de irrigação IPH 02 207**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul - RS, Instituto de Pesquisa Hidráulica, 2003. 56 p.

CHRISTIANSEN, E.J. **Irrigation by sprinkling**. Berkeley: University of California. (Bulletttin, 670). 1942. 142 p.

COELHO, E. F.; COELHO FILHO, M. A.; OLIVEIRA, S. L. Agricultura irrigada: eficiência de irrigação e de uso de água. **Revista Bahia Agrícola**, Salvador, v. 7, n. 1, p. 57-60, 2005.

CONCEIÇÃO, M. A. F. **Simulação da distribuição de água em microaspersores sob condição de vento**. 2002. 110 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - ESALQ/USP, Piracicaba, 2002.

COSTA, M. C. **Caracterização hidráulica de dois modelos de microaspersores associados a três reguladores de fluxo e um mecanismo de pulso**. 1994. 109 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - ESALQ/USP, Piracicaba, 1994.

CRESSIE, N. **Statistics for spatial data**. New York: John Wiley. 1993. 900 p.

CRESSIE, N.; HAWKINS, D. M. Robust estimation of the variogram, I. **Mathematical Geology**, New York, v. 12, n. 2, p. 115-125, 1980.

CRIDDLE, W. D. **Methods for evaluating irrigations systems agriculture**. (S.l.): Hand Book, 1956. 82 p.

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

DIGGLE, P. J.; RIBEIRO JR, P. J. **Model based geoestatistics**. New York: Springer, 2007. 230 p.

FAGANELLO, C. R. F.; FOLEGATTI, M. V. ; GONÇALVES, R. A. B.; LUCAS, A. A. T. Uso da água de irrigação do Ribeirão do Marins no município de Piracicaba/SP. **Irriga**, Botucatu, v. 12, n. 4, p. 456-470. 2007.

FARACO, M. A.; URIBE-OPAZO, M. A.; SILVA, E. A.; JOHANN J. A.; BORSSOI, J. A. Seleção de modelos de variabilidade espacial para elaboração de mapas temáticos de atributos físicos do solo e produtividade da soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa-MG, v. 32, n. 2, p. 463-476, 2008.

FERREIRA FILHO, W. M. N.; NOGUEIRA, L. A. A.; BEMFEITO, C. J. S. Aplicação da metodologia Kriging à pluviometria no estado do Ceará. In: SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE, 5., Natal. 2000. **Anais...** Porto Alegre: ABRH, 2000. 1 CD-ROM.

FILGUEIRA, F. A. R. **Novo manual de olericultura**. Agrotecnologia moderna na produção e comercialização de hortaliças. Viçosa: UFV; Editora Folha de Viçosa, 2000. 402 p.

FRAVET, A. M. M.; CRUZ, R. L. Qualidade da água utilizada para irrigação de hortaliças na região de Botucatu-SP. **Irriga**, Botucatu, v. 12, n. 2, p. 144-155. 2007.

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.

FRIZZONE, J. A. **Irrigação por aspersão**: uniformidade e eficiência. Piracicaba: ESALQ/USP, 1992, 53 p. (Série Didática 3).

FRIZZONE, J. A.; DOURADO NETO, D. Avaliação de sistemas de irrigação. *In*: Miranda, J.H.; PIRES, R.C.M. **Irrigação**. Jaboticabal: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 2003. v. 2, p. 573-651.
7

FUKUDA, C.; FUKUDA, W. M. G.; SOUZA, A. S. Seleção de cultivares e clones de mandioca resistentes a antracnose. IN: CONGRESSO BRASILEIRO DE MANDIOCA, 1., 1979, Salvador, BA. **Anais...** Brasília, DF: EMBRAPA-DID/SBM, 1981. p. 503-512.

FUKUDA, H. **Irrigation in the world**. Japão: University of Tokyo Press, 1976. 329 p.

GOMES, P. F. **Curso de estatística experimental**. Piracicaba: Nobel, 1987.

GOMES, F.P.; **Curso de estatística experimental,** 14ª ed. Piracicaba, Degaspari. 477p. 2000.

GONÇALVES, A. C. A. **Variabilidade espacial de propriedades físicas do solo para fins de manejo da irrigação**. 1997. 118 f. Tese (Doutorado em Agronomia, Área de concentração em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1997.

GUEDES, L. P. C.; URIBE-OPAZO, M. A.; JOHANN, J. A.; SOUZA, E. G. Anisotropia no estudo da variabilidade espacial de algumas variáveis químicas do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa-MG, v. 32, n. 6, p. 2217-2226, 2008.

GUERRA, A. F. **Adequação e manejo das irrigações por aspersores por pivô central no cerrado**. EMBRAPA/CPAC, 2004. Disponível em: http://www.agronline.com.br/artigos. Acesso em: 27 maio 2010.

HAGAN, R. M.; RAISER, R. H.; EDMINSTER, T. W. Irrigation of agricultural lands. **American Society of Agronomy,** série Agronomy. Madison, n. 11. 1179 p. 1967.

HERNANDEZ, F. B. T. **Manejo da irrigação**. 2004. Disponível em: http://www.irrigaterra.com.br/manejo.php. Acesso em: 24 maio 2010.

HICKEL, E.; CALEGARRIO, F. F.; MELO, G. W. B.; KUHN, G. B.; NACHTIGAL, J. C.; MAIA, J. D. G.; PROTAS, J. F. S.; MELLO, L. M. R.; GARRIDO, L. R.; CONCEIÇÃO, M. A. F.; BOTTON, M.; SÔNEGO, O. R.; NAVES, R. L.; SORIA, S. J.; FOJARDO, T. V. M.; CAMARGO, U. A. **Uvas sem sementes cultivares BRS** m**orena**, **BRS clara e BRS linda**. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária Uva e Vinho, n. 8, 2005. Disponível em: http://www.cnpuv.embrapa.br/publica/sprod/UvasSemSementes/expediente.htm. Acesso em: 25 maio 2012.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Censo 2010**. Disponível em: <http://www.sidra.ibge.gov. br/>. Acesso em: 24 maio 2010.

ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. **An introduction to applied geostatistics**. New York: Oxford University Press, 1989. 561 p.

JOURNEL, A. G.; HUIJBREGTS, C. H. J. **Mining geostatistics**. 7. ed. New York: Academic Press, 1997. 600 p.

JUSTI, A. L.; VILAS BOAS, M. A.; SAMPAIO, S. C. Índice de capacidade do processo na avaliação da irrigação por aspersão. **Eng. Agríc**., Jaboticabal, v. 30, n. 2, p. 264-270, mar/abr. 2010.

KITANIDIS, P. K. Statistical estimation of polynomial generalized covariance functions and hydrologic applications. **Water Resources Research.** v. 19, n. 4, p. 909-921, 1983.

KUME, H. **Statistical methods for quality improvement**.Tokyo Aots, 1989. 231 p.

LANDIM, P. M.B. **Análise estatística de dados geológicos**. São Paulo: ed. UNESP, 2011. 226 p.

MANTOVANI, E. C.; BERNARDO, S.; PALARETTI, L. F. **Irrigação**: princípios e métodos. 2. ed. Viçosa: Ed. UFV, 2007. 358 p.

MARDIA, K; MARSHALL, R. Maximum likelihood estimation of models for residual covariance in spatial regression. **Biometrika**, Alemanha, v. 71, p. 135-146, 1984.

MARTINS, J. F. S.; CUNHA, U. S.; NEVES, M. B.; MACKEDANZ, V.; VINHAS, M. R.; MATTOS, M. L. T.; AFONSO, A. P. S. Influência de períodos de supressão da irrigação por inundação da cultura do arroz (Oryza sativa) na população do gorgulhoaquático Oryzophagus oryzae (Costa Lima) (Coleoptera: Curculionidae) e produção de grãos. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENTOMOLOGIA, 22., 2008, Uberlândia- MG. **Resumos...** Uberlândia -MG: SEB, 2008. 1 CD-ROM.

MATÉRN, B. **Spatial variation**. Lectures notes in statistics. 2. ed. Berlin: Springer-Verlag. 1986. n. 36.

MATHERON, G. **Principles of geostatictics**. Lancaster: Economic Geology. 1963. v. 58, p. 1246-1266,

McBRATNEY, A. B.; WEBSTER, R. Choosing functions for semi-variograms of soil properties and fitting them to sampling estimates. **Journal Soil Science**, Oxford, v. 37, n. 3, p. 617-639, 1986.

MELLO, J. M.; BATISTA, J. L. F.; OLIVEIRA, M. S.; JÚNIOR, P. J. R. Estudo da dependência espacial de características dendrométricas para Eucalyptus grandis. **CERNE**, Lavras-MG, v. 11, n. 2, p. 113-126, abr/jun. 2005.

MERCANTE, E.; URIBE-OPAZO, M. A.; SOUZA, E. G. Variabilidade espacial e temporal da resistência mecânica do solo à penetração em áreas com e sem manejo químico localizado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 6, p. 1149-1159, 2003.

MINITAB. **User'Guide Release 16 for Windows**. 2012.

MONTENEGRO, A. A. T.; BEZERRA, F. M. L.; LIMA, R. N. Evapotranspiração e coeficientes de cultura do mamoeiro para a região litorânea do Ceará. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 24, n. 2, p. 464-472, 2004.

MONTGOMERY, D. C. **Introdução ao controle estatístico da qualidade**. 4. ed. Rio de Janeiro-RJ: LTC, 2004, 513 p.

MULLA, D. J. Mapping and managing spatial patterns in soil fertility and crop yield. *In*: ROBERT, P. C.; RUST, R. H.; LARSON, W. E. **Soil specific crop management**. Madison: ASA-CSSA-SSSA, 1993. p. 15-26.

PAULINO M. A. O.; FIGUEIREDO F. P.; FERNANDES R. C.; MAIA J. T. L. S.; GUILHERME D. O.; BARBOSA F. S. Avaliação da uniformidade e eficiência de aplicação de água em sistemas de irrigação por aspersão convencional. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza-CE, v. 3, n. 2, p. 48-54, 2009.

PAZ, A.; TABOADA, M. T.; GÓMEZ, M. J. Spatial variability in topsoil micronutrients contents in one-hectare cropland plot. **Communication in Soil Science and Plant Analysis**, United States, v. 27, n. 3/4, p. 479-503, 1996.

PEREIRA, G.M. **Irrigação por aspersão convencional**. Lavras: UFLA/FAEPE, 2001.

PLAYÁN, E.; ZAPATA, N.; FACI, J. M.; TOLOSA, D.; LACUEVA, J. L.; PELEGRÍN, J.; SALVADOR, R.; SÁNCHEZ, I.; LAFITA, A. Assessing sprinkler irrigation uniformity using a ballistic simulation model. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 84, p. 89-100, 2006.

PREVEDELLO, B. M. S. **Variabilidade espacial de parâmetros de solo e planta**. 1987. 166 f. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1987.

R DEVELOPMENT CORE TEAM. R: **A language and environment for statistical computing**. R. Foundation for Statistical Computing, Viena, Austria. 2009. ISBN 3-90005107-0. Disponível em: http://www.R-project.org. Acesso em: 20 fev. 2011.

REICHARDT, K.; VIEIRA, S. R.; LIBARDI, P. L. Variabilidade espacial de solos e experimentação de campo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa-MG, v. 10, n. 1, p. 1-6, 1986.

RIBEIRO JR, P. J.; DIGGLE, P. J. **geoR**: a package for geostatistical analysis, R-NEWS, CRAN. R-project.org/doc/Rnews/. v. 1, n. 2, p. 14-18, 2001.

ROCHA, F. A.; PEREIRA, G. M.; ROCHA, F. S.; SILVA, J. O. Análise da uniformidade de distribuição de água de um equipamento autopropelido. **Irriga**, Botucatu-SP, v. 10, n. 1, p. 96-106, 2005.

RODRIGUES A. A.; SILANS A. M. B. P. Estudo da variabilidade espacial da precipitação na região do cariri no estado da Paraíba. ENCONTRO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA UFPB, 9., 2001. João Pessoa-PB. **Anais...** João Pessoa-PB: UFPB, 2001. 1 CD-ROM.

SALVIANO, A. A. C.; VIEIRA, S. R.; SPAROVEK, G. Dependência espacial dos teores de macronutrientes da parte aérea da Crotalária juncea em área de erosão acelerada. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa-MG, v. 25, p. 115-122, 1995.

SCHABENBERGER, O.; GOTWAY, C.A. **Statistical methods for spatial data analysis**, Boca Raton: Chapman & Hall / CRC, 2005. 488 p.

SCHERPINSKI, C.; URIBE-OPAZO, M. A.; BOAS, M. A. V.; SAMPAIO, S. C.; JOHANN, J. A. Variabilidade espacial da condutividade hidráulica e da infiltração da água no solo. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá-PR, v. 32, n. 1, p. 7-13, 2010. DOI: 10.4025.

SCOTT, H. D.; MAUROMOUSTAKOS, A.; HANDAYANI, I. P. ; MILLER, D. M. Temporal variability of selected properties of loessial soil as affected by cropping. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 58, p. 1531-1538, 1994.

SILVA C. A.; SILVA C. J. Avaliação de uniformidade em sistemas de irrigação localizada. **Revista Científica Eletrônica de Agronomia,** Faculdade de Agronomia e Engenharia Florestal de Garça/FAEF. Garça, SP. Ano IV, n. 8. dez. 2005. ISSN 1677 - 0293.

SOUZA, E. A. M.; SOUZA, P. C.; VILAS BOAS, M. A. Avaliação do desempenho de sistemas de irrigação por aspersão convencional fixo e gotejamento em vila rural. **Irriga**, Botucatu, v. 11, n. 1, p. 47-62, 2008.

SOUZA, E. G.; JOHANN, J. A.; ROCHA, J. V. ; RIBEIRO, S. R. A.; SILVA, M. S.; URIBE-OPAZO, M. A.; MOLIN, J. P. ; OLIVEIRA, E. F.; NOBREGA, L. H. P.; OLIVEIRA, E. F.; Variabilidade espacial dos atributos químicos do solo em um latossolo roxo distrófico da região de Cascavel-PR. **Revista Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, SP, v. 18, n. 3, p. 80-92, 1999.

SOUZA, E. O.; TRICOLI, V.; FRANCHINI, E.; PAULO, A. C.; REGAZZINI, M.; UGRINOWITSCH, C. Acute effect of two aerobic exercise modes on maximum strength and endurance. **Journal of Strength and Conditioning Research**, v. 21, n. 14, p. 1286-1290, 2007.

SOUZA, L. C. **Variabilidade espacial da salinidade de um solo aluvial no semi-árido paraibano**. 1999. 77 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, 1999.

TABOR, J. A.; WARRICK, A. W.; PENNINGTON, D. A.; MYERS, D. E. Spatial variability of nitrate in irrigated cotton: I. Petioles. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 48, p. 602-607, 1984.

TUNDISI, J. G., **Água no século XXI**: Enfrentando a escassez. São Paulo: Rima, 2005, 248 p.

TUNDISI, J. G. Ciclo hidrológico e gerenciamento integrado. **Ciência e Cultura**, São Paulo, v. 55, n. 4 p. 31-33, 2003.

VIEIRA, S. R. **Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo**. *In*: Novais, R. F.; Alvarez, V. V. H.; Schaefer, (ed.), C. E. G. R. Tópicos em Ciência do Solo, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v. 1, p. 1-54, 2000.

VIEIRA, S. R.; DE MARIA, I. C.; CASTRO, O. M.; DECHEN, S. C. F.; LOMBARDI NETO, F. Utilização da análise de Fourier no estudo do efeito residual da adubação em uva na crotalária. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 11, n. 7, p. 7-10, 1987.

VIEIRA, S. R.; HATFIELD, J. L.; NIELSEN, D. R.; BIGGAR, J. W. Geostatistical theory and application to variability of some agronomical properties. **Hilgardia**, v. 51, n. 3, p. 1-75, 1983.

WERKEMA, M. C. **Avaliação da Qualidade de Medidas.** 1. ed., Belo Horizonte, MG: FCO, 1996. 86 p.

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

ZOCOLER, J. L. **Avaliação de desempenho de sistemas de irrigação**. Ilha Solteira - SP: UNESP. Disponível em: http://www.agr.feis.unesp. br/irrigacao.html. Acesso em: 27 mar. 2005.

ANEXO

ANEXO A FATORES PARA CONSTRUÇÃO DE GRÁFICOS DE CONTROLE PARA VARIÁVEIS

Observações na Amostra, n	Gráfico para Médias: Fatores para Limites de Controle			Gráficos para Desvios Padrão: Fatores para Linha Central		Gráficos para Desvios Padrão: Fatores para Limites de Controle				Gráficos para Amplitudes: Fatores para Linha Central			Gráficos para Amplitudes: Fatores para Limites de Controle			
	A	A_2	A_3	c_4	$1/c_4$	B_3	B_4	B_5	B_6	d_2	$1/d_2$	d_3	D_1	D_2	D_3	D_4
2	2,121	1,880	2,659	0,7979	1,2533	0	3,267	0	2,606	1,128	0,8865	0,853	0	3,686	0	3,267
3	1,732	1,023	1,954	0,8862	1,1284	0	2,568	0	2,276	1,693	0,5907	0,888	0	4,358	0	2,575
4	1,500	0,729	1,628	0,9213	1,0854	0	2,266	0	2,088	2,059	0,4857	0,880	0	4,698	0	2,282
5	1,342	0,577	1,427	0,9400	1,0638	0	2,089	0	1,964	2,326	0,4299	0,864	0	4,918	0	2,115
6	1,225	0,483	1,287	0,9515	1,0510	0,030	1,970	0,029	1,874	2,534	0,3946	0,848	0	5,078	0	2,004
7	1,134	0,419	1,182	0,9594	1,0423	0,118	1,882	0,113	1,806	2,704	0,3698	0,833	0,204	5,204	0,076	1,924
8	1,061	0,373	1,099	0,9650	1,0363	0,185	1,815	0,179	1,751	2,847	0,3512	0,820	0,388	5,306	0,136	1,864
9	1,000	0,337	1,032	0,9693	1,0317	0,239	1,761	0,232	1,707	2,970	0,3367	0,808	0,547	5,393	0,184	1,816
10	0,949	0,308	0,975	0,9727	1,0281	0,284	1,716	0,276	1,669	3,078	0,3249	0,797	0,687	5,469	0,223	1,777
11	0,905	0,285	0,927	0,9754	1,0252	0,321	1,679	0,313	1,637	3,173	0,3152	0,787	0,811	5,535	0,256	1,744
12	0,866	0,266	0,886	0,9776	1,0229	0,354	1,646	0,346	1,610	3,258	0,3069	0,778	0,922	5,594	0,283	1,717
13	0,832	0,249	0,850	0,9794	1,0210	0,382	1,618	0,374	1,585	3,336	0,2998	0,770	1,025	5,647	0,307	1,693
14	0,802	0,235	0,817	0,9810	1,0194	0,406	1,594	0,399	1,563	3,407	0,2935	0,763	1,118	5,696	0,328	1,672
15	0,775	0,223	0,789	0,9823	1,0180	0,428	1,572	0,421	1,544	3,472	0,2880	0,756	1,203	5,741	0,347	1,653
16	0,750	0,212	0,763	0,9835	1,0168	0,448	1,552	0,440	1,526	3,532	0,2831	0,750	1,282	5,782	0,363	1,637
17	0,728	0,203	0,739	0,9845	1,0157	0,466	1,534	0,458	1,511	3,588	0,2787	0,744	1,356	5,820	0,378	1,622
18	0,707	0,194	0,718	0,9854	1,0148	0,482	1,518	0,475	1,496	3,640	0,2747	0,739	1,424	5,856	0,391	1,608
19	0,688	0,187	0,698	0,9862	1,0140	0,497	1,503	0,490	1,483	3,689	0,2711	0,734	1,487	5,891	0,403	1,597
20	0,671	0,180	0,680	0,9869	1,0133	0,510	1,490	0,504	1,470	3,735	0,2677	0,729	1,549	5,921	0,415	1,585
21	0,655	0,173	0,663	0,9876	1,0126	0,523	1,477	0,516	1,459	3,778	0,2647	0,724	1,605	5,951	0,425	1,575
22	0,640	0,167	0,647	0,9882	1,0119	0,534	1,466	0,528	1,448	3,819	0,2618	0,720	1,659	5,979	0,434	1,566
23	0,626	0,162	0,633	0,9887	1,0114	0,545	1,455	0,539	1,438	3,858	0,2592	0,716	1,710	6,006	0,443	1,557
24	0,612	0,157	0,619	0,9892	1,0109	0,555	1,445	0,549	1,429	3,895	0,2567	0,712	1,759	6,031	0,451	1,548
25	0,600	0,153	0,606	0,9896	1,0105	0,565	1,435	0,559	1,420	3,931	0,2544	0,708	1,806	6,056	0,459	1,541

Para $n > 25$.

$$A = \frac{3}{\sqrt{n}} \qquad A_3 = \frac{3}{c_4\sqrt{n}} \qquad c_4 = \frac{4(n-1)}{4n-3}$$

$$B_3 = 1 - \frac{3}{c_4\sqrt{2(n-1)}} \qquad B_4 = 1 + \frac{3}{c_4\sqrt{2(n-1)}}$$

$$B_5 = c_4 - \frac{3}{\sqrt{2(n-1)}} \qquad B_6 = c_4 + \frac{3}{\sqrt{2(n-1)}}$$

APÊNDICE

APÊNDICE A ESTATÍTICA DESCRITIVA DOS DADOS DOS COLETORES

Tabela B 1 Estatística descritiva dos coletores, durante os 32 ensaios realizados com aspersores compensantes com altura de 1,0 m

Coletor	Média	Desvio Padrão	Coeficiente de Variação	Mínimo	Máximo
1	2,13	0,45	20,99	1	3
2	2,33	0,52	22,12	1	3,5
3	2,54	0,57	22,56	1,3	3,5
4	2,62	0,57	21,89	1,5	3,5
5	2,66	0,55	20,70	1,5	3,5
6	2,71	0,56	20,53	1,5	3,5
7	2,75	0,53	19,40	1,5	3,5
8	2,78	0,54	19,27	1,5	3,5
9	2,82	0,52	18,50	1,6	3,5
10	2,84	0,54	19,13	1,6	4
11	2,84	0,54	19,13	1,6	4
12	2,88	0,52	17,95	1,7	4
13	2,91	0,52	17,84	1,7	4
14	2,93	0,51	17,35	1,8	4
15	2,98	0,53	17,86	1,9	4
16	3,00	0,51	17,13	2	4
17	3,02	0,53	17,42	2	4
18	3,04	0,52	17,24	2	4
19	3,06	0,52	17,07	2	4
20	3,08	0,52	17,03	2	4
21	3,13	0,53	16,89	2	4
22	3,16	0,53	16,65	2	4
23	3,17	0,52	16,36	2	4
24	3,19	0,52	16,26	2	4
25	3,21	0,51	15,85	2	4
26	3,21	0,51	15,85	2	4
27	3,22	0,51	15,88	2	4
28	3,22	0,51	15,88	2	4
29	3,22	0,51	15,88	2	4
30	3,24	0,50	15,57	2	4
31	3,26	0,52	15,95	2	4
32	3,29	0,53	16,12	2	4
33	3,30	0,52	15,85	2	4
34	3,31	0,52	15,74	2	4
35	3,31	0,52	15,63	2	4
36	3,34	0,51	15,42	2	4
37	3,35	0,51	15,29	2	4
38	3,36	0,51	15,23	2	4
39	3,38	0,53	15,60	2	4,2
40	3,43	0,54	15,65	2	4,4
41	3,45	0,54	15,64	2	4,5
42	3,47	0,53	15,16	2,1	4,5
43	3,49	0,53	15,13	2,1	4,5
44	3,49	0,53	15,11	2,1	4,5
45	3,52	0,51	14,47	2,1	4,5
46	3,55	0,53	14,92	2,1	4,5
47	3,56	0,52	14,67	2,2	4,5

Coletor	Média	Desvio Padrão	Coeficiente de Variação	Mínimo	Máximo
48	3,58	0,52	14,44	2,2	4,5
49	3,58	0,51	14,19	2,3	4,5
50	3,62	0,48	13,26	2,5	4,5
51	3,62	0,48	13,26	2,5	4,5
52	3,63	0,48	13,24	2,5	4,5
53	3,64	0,49	13,35	2,5	4,5
54	3,65	0,48	13,28	2,5	4,5
55	3,66	0,48	13,13	2,5	4,5
56	3,67	0,48	13,16	2,5	4,5
57	3,68	0,47	12,80	2,5	4,5
58	3,70	0,48	12,84	2,5	4,5
59	3,71	0,48	12,84	2,5	4,5
60	3,71	0,47	12,65	2,5	4,5
61	3,73	0,47	12,50	2,5	4,5
62	3,74	0,47	12,53	2,5	4,5
63	3,78	0,48	12,81	2,5	4,5
64	3,79	0,49	12,84	2,5	4,5
65	3,81	0,47	12,44	2,5	4,5
66	3,89	0,51	13,19	2,5	4,5
67	3,90	0,51	13,09	2,5	4,5
68	3,91	0,52	13,21	2,5	4,5
69	3,93	0,52	13,15	2,5	4,6
70	3,94	0,52	13,10	2,5	4,7
71	3,97	0,53	13,23	2,6	4,7
72	3,98	0,52	13,00	2,7	4,7
73	4,03	0,51	12,68	3	5
74	4,04	0,52	12,77	3	5
75	4,07	0,53	13,01	3	5
76	4,07	0,53	13,09	3	5
77	4,09	0,52	12,72	3	5
78	4,11	0,52	12,63	3	5
79	4,13	0,52	12,55	3	5
80	4,13	0,52	12,55	3	5
81	4,15	0,51	12,39	3	5
82	4,18	0,49	11,69	3	5,1
83	4,24	0,46	10,91	3,5	5,1
84	4,27	0,46	10,88	3,5	5,1
85	4,29	0,48	11,13	3,5	5,2
86	4,30	0,48	11,05	3,5	5,2
87	4,33	0,48	11,02	3,5	5,2
88	4,37	0,46	10,46	3,5	5,2
89	4,42	0,49	11,08	3,5	5,3
90	4,44	0,51	11,39	3,5	5,4
91	4,47	0,49	10,92	3,5	5,4
92	4,51	0,50	11,07	3,5	5,4
93	4,55	0,49	10,72	3,5	5,4
94	4,61	0,52	11,31	3,5	5,5
95	4,68	0,55	11,68	3,5	5,5
96	4,73	0,56	11,83	3,5	5,5
97	4,80	0,54	11,24	3,5	5,5
98	4,93	0,56	11,35	3,5	5,9
99	5,09	0,57	11,19	4	6
100	5,33	0,64	11,95	4	6,3

Tabela B 2 Estatística descritiva dos coletores, durante os 32 ensaios realizados com aspersores compensantes com altura de 1,5 m

Coletor	Média	Desvio Padrão	Coeficiente de Variação	Mínimo	Máximo
1	1,83	0,32	17,27	1	2,5
2	2,04	0,42	20,47	1,2	3
3	2,14	0,40	18,82	1,5	3
4	2,20	0,45	20,23	1,5	3
5	2,23	0,43	19,27	1,5	3
6	2,31	0,44	19,16	1,5	3
7	2,33	0,45	19,20	1,5	3
8	2,35	0,44	18,78	1,5	3
9	2,38	0,44	18,27	1,5	3
10	2,42	0,46	18,84	1,5	3,2
11	2,44	0,45	18,53	1,5	3,3
12	2,45	0,45	18,25	1,5	3,3
13	2,48	0,46	18,70	1,5	3,3
14	2,51	0,47	18,65	1,5	3,5
15	2,52	0,46	18,40	1,5	3,5
16	2,53	0,46	18,15	1,5	3,5
17	2,56	0,51	19,77	1,5	3,5
18	2,57	0,50	19,41	1,5	3,5
19	2,58	0,49	18,96	1,5	3,5
20	2,59	0,49	19,00	1,5	3,5
21	2,61	0,49	18,87	1,5	3,5
22	2,62	0,50	18,93	1,5	3,5
23	2,63	0,50	18,89	1,5	3,5
24	2,64	0,49	18,50	1,5	3,5
25	2,65	0,48	18,01	1,6	3,5
26	2,65	0,48	17,99	1,6	3,5
27	2,66	0,48	17,94	1,6	3,5
28	2,69	0,51	18,85	1,6	3,5
29	2,70	0,51	18,81	1,6	3,5
30	2,72	0,51	18,87	1,6	3,5
31	2,73	0,53	19,27	1,6	3,5
32	2,74	0,53	19,26	1,6	3,6
33	2,76	0,53	19,33	1,6	3,6
34	2,77	0,53	19,28	1,6	3,6
35	2,77	0,53	19,29	1,6	3,7
36	2,78	0,53	19,04	1,6	3,7
37	2,79	0,53	18,87	1,7	3,8
38	2,81	0,52	18,38	1,7	3,8
39	2,82	0,52	18,38	1,7	3,8
40	2,83	0,52	18,41	1,7	3,8
41	2,83	0,52	18,41	1,7	3,8
42	2,84	0,52	18,22	1,7	3,8
43	2,87	0,53	18,37	1,7	3,8
44	2,87	0,52	18,28	1,7	3,8
45	2,88	0,53	18,42	1,8	4
46	2,89	0,52	18,06	1,8	4
47	2,89	0,52	18,09	1,8	4
48	2,92	0,52	17,72	2	4
49	2,92	0,52	17,75	2	4
50	2,93	0,52	17,63	2	4

Coletor	Média	Desvio Padrão	Coeficiente de Variação	Mínimo	Máximo
51	2,93	0,51	17,50	2	4
52	2,94	0,50	16,91	2	4
53	2,95	0,50	17,05	2	4
54	2,95	0,50	17,05	2	4
55	2,97	0,50	16,77	2	4
56	2,98	0,50	16,77	2	4
57	2,98	0,49	16,60	2	4
58	2,98	0,49	16,35	2	4
59	2,98	0,49	16,35	2	4
60	2,99	0,49	16,25	2	4
61	3,00	0,48	15,88	2	4
62	3,01	0,48	15,87	2	4
63	3,06	0,51	16,64	2	4
64	3,08	0,51	16,71	2	4
65	3,09	0,51	16,38	2	4
66	3,10	0,50	16,17	2	4
67	3,11	0,50	16,02	2	4
68	3,13	0,51	16,26	2	4
69	3,15	0,52	16,54	2	4
70	3,17	0,53	16,90	2	4
71	3,18	0,54	16,98	2	4
72	3,19	0,55	17,15	2	4
73	3,22	0,55	17,13	2	4
74	3,23	0,56	17,24	2	4
75	3,24	0,54	16,78	2	4
76	3,25	0,54	16,70	2	4
77	3,25	0,54	16,62	2	4
78	3,26	0,53	16,20	2,2	4
79	3,27	0,53	16,25	2,2	4
80	3,27	0,53	16,25	2,2	4
81	3,30	0,53	16,15	2,3	4
82	3,31	0,53	15,95	2,3	4
83	3,33	0,52	15,55	2,4	4
84	3,35	0,50	14,77	2,5	4
85	3,38	0,49	14,40	2,5	4
86	3,40	0,48	14,28	2,5	4
87	3,41	0,48	14,14	2,5	4
88	3,45	0,48	14,05	2,5	4,1
89	3,48	0,49	14,17	2,5	4,2
90	3,54	0,49	13,90	2,5	4,2
91	3,60	0,48	13,29	2,5	4,5
92	3,63	0,47	13,00	2,5	4,5
93	3,70	0,51	13,90	2,5	4,5
94	3,72	0,52	13,94	2,5	4,5
95	3,74	0,51	13,74	2,6	4,6
96	3,82	0,50	12,98	3	4,6
97	3,90	0,50	12,84	3	5
98	4,01	0,53	13,28	3	5
99	4,10	0,52	12,73	3	5
100	4,19	0,55	13,17	3	5,5

Tabela B 3 Estatística descritiva dos coletores, durante os 32 ensaios realizados com aspersores não compensantes com altura de 1,0 m

Coletor	Média	Desvio Padrão	Coeficiente de Variação	Mínimo	Máximo
1	1,99	0,50	25,15	1	3
2	2,27	0,49	21,37	1,5	3
3	2,39	0,45	18,93	1,5	3
4	2,47	0,50	20,30	1,5	3,5
5	2,51	0,50	19,88	1,5	3,5
6	2,54	0,49	19,46	1,6	3,5
7	2,57	0,50	19,38	1,6	3,5
8	2,60	0,50	19,08	1,6	3,5
9	2,61	0,49	18,81	1,7	3,5
10	2,66	0,49	18,47	1,8	3,5
11	2,71	0,48	17,71	2	3,5
12	2,74	0,48	17,64	2	3,5
13	2,81	0,50	17,90	2	3,6
14	2,84	0,52	18,17	2	4
15	2,93	0,50	17,25	2	4
16	2,94	0,51	17,38	2	4
17	2,98	0,50	16,70	2	4
18	3,00	0,50	16,62	2,1	4
19	3,02	0,50	16,72	2,1	4
20	3,03	0,52	17,01	2,1	4
21	3,08	0,55	17,81	2,1	4
22	3,11	0,54	17,36	2,2	4
23	3,14	0,55	17,53	2,2	4
24	3,18	0,55	17,26	2,3	4
25	3,22	0,55	17,19	2,4	4,2
26	3,25	0,56	17,07	2,4	4,2
27	3,29	0,55	16,73	2,5	4,2
28	3,32	0,57	17,33	2,5	4,4
29	3,33	0,59	17,81	2,5	4,5
30	3,36	0,58	17,37	2,5	4,5
31	3,38	0,57	16,72	2,5	4,5
32	3,40	0,57	16,87	2,5	4,5
33	3,42	0,57	16,79	2,5	4,5
34	3,43	0,57	16,48	2,5	4,5
35	3,45	0,58	16,85	2,5	4,6
36	3,47	0,61	17,50	2,5	5
37	3,48	0,61	17,53	2,5	5
38	3,49	0,60	17,26	2,5	5
39	3,50	0,60	17,17	2,5	5
40	3,52	0,59	16,90	2,5	5
41	3,53	0,58	16,52	2,6	5
42	3,54	0,59	16,68	2,6	5
43	3,55	0,58	16,38	2,6	5
44	3,57	0,60	16,71	2,6	5
45	3,58	0,59	16,54	2,6	5
46	3,60	0,58	16,06	2,7	5
47	3,61	0,58	15,98	2,7	5
48	3,62	0,58	16,04	2,7	5
49	3,62	0,58	15,99	2,7	5
50	3,65	0,57	15,58	2,7	5
51	3,67	0,58	15,85	2,7	5

Coletor	Média	Desvio Padrão	Coeficiente de Variação	Mínimo	Máximo
52	3,69	0,57	15,58	2,7	5
53	3,71	0,57	15,29	2,7	5
54	3,74	0,56	14,86	2,8	5
55	3,76	0,55	14,49	2,8	5
56	3,77	0,55	14,60	2,8	5
57	3,80	0,55	14,42	2,8	5
58	3,81	0,55	14,50	2,8	5
59	3,83	0,57	14,82	2,8	5
60	3,86	0,58	15,08	2,8	5
61	3,88	0,58	14,92	2,9	5
62	3,90	0,58	14,94	2,9	5
63	3,92	0,58	14,88	3	5
64	3,93	0,58	14,76	3	5
65	3,94	0,58	14,66	3	5
66	3,95	0,58	14,69	3	5
67	3,96	0,57	14,49	3	5
68	3,97	0,57	14,32	3	5
69	3,98	0,58	14,50	3	5
70	4,03	0,58	14,42	3	5,2
71	4,08	0,62	15,10	3	5,5
72	4,10	0,62	15,09	3	5,5
73	4,14	0,61	14,79	3	5,5
74	4,16	0,61	14,64	3	5,5
75	4,22	0,63	15,00	3	5,5
76	4,25	0,66	15,48	3	5,5
77	4,26	0,66	15,46	3	5,5
78	4,27	0,65	15,12	3	5,5
79	4,28	0,65	15,24	3	5,5
80	4,29	0,65	15,17	3	5,5
81	4,30	0,66	15,28	3	5,5
82	4,33	0,65	15,05	3	5,5
83	4,36	0,64	14,77	3	5,5
84	4,40	0,66	14,91	3	5,5
85	4,43	0,66	14,86	3,1	5,5
86	4,45	0,65	14,62	3,1	5,5
87	4,48	0,64	14,23	3,1	5,5
88	4,51	0,63	13,96	3,2	5,5
89	4,54	0,62	13,61	3,3	5,5
90	4,55	0,61	13,43	3,3	5,5
91	4,58	0,62	13,61	3,3	5,7
92	4,61	0,63	13,76	3,3	5,7
93	4,66	0,67	14,36	3,3	6
94	4,69	0,67	14,23	3,4	6
95	4,72	0,67	14,28	3,4	6
96	4,78	0,72	15,08	3,4	6
97	4,83	0,75	15,57	3,4	6
98	4,93	0,81	16,38	3,4	6
99	4,98	0,98	19,70	2,4	6,5
100	5,15	0,92	17,89	3,5	6,5

Tabela B 4 Estatística descritiva dos coletores, durante os 24 ensaios realizados com aspersores não compensantes com altura de 1,5 m

Coletor	Média	Desvio Padrão	Coeficiente de Variação	Mínimo	Máximo
1	2,82	0,77	27,34	1,8	5
2	3,11	0,75	24,15	1,7	5
3	3,03	0,77	25,32	1	5
4	2,91	0,80	27,53	0,8	5
5	2,78	0,81	29,18	0,9	5
6	2,88	0,78	26,95	0,9	4,8
7	2,96	0,79	26,78	1	4,8
8	3,12	0,85	27,31	2	4,8
9	2,90	0,90	31,05	1,5	4,8
10	2,22	0,75	33,73	1	4,8
11	3,32	0,86	25,89	2	6
12	3,67	0,82	22,35	2	6
13	3,48	0,88	25,32	2	6
14	3,18	0,80	25,16	1,6	5,2
15	3,00	0,77	25,69	1,5	5
16	3,00	0,72	24,07	1,8	5
17	3,11	0,76	24,40	2	5
18	3,22	0,74	23,03	2	4,8
19	2,86	0,78	27,37	1,8	5
20	2,56	0,87	33,81	1,2	5,8
21	3,68	0,89	24,20	2	6
22	3,70	0,72	19,44	2,5	6
23	3,62	0,62	17,11	2,5	5
24	3,27	0,81	24,87	2,2	5,8
25	3,30	0,78	23,71	2	5,2
26	3,18	0,67	21,06	2	5
27	3,17	0,67	21,00	1,8	5
28	3,03	0,72	23,92	1,7	5
29	2,75	0,71	25,73	1,5	5
30	2,79	0,70	24,92	1,6	5
31	3,76	0,82	21,80	2	5,8
32	3,94	0,74	18,82	2,7	5,8
33	3,79	0,82	21,72	2,5	6
34	3,36	0,70	20,68	2,5	5,8
35	3,30	0,71	21,59	2,5	5,8
36	3,29	0,76	23,24	2,2	6
37	3,19	0,81	25,29	1,8	6
38	2,86	0,70	24,41	1,7	5,5
39	2,81	0,78	27,87	1,8	6
40	2,68	0,75	27,91	1,5	5
41	3,73	0,61	16,29	2,6	5
42	3,99	0,72	17,98	3	6
43	3,78	0,66	17,51	2,8	6
44	3,52	0,81	23,09	2,5	6
45	3,28	0,72	21,98	2	5
46	3,23	0,74	22,83	2	5
47	3,26	0,78	23,88	2	5,5
48	3,08	0,74	23,93	2,2	6
49	2,81	0,83	29,40	1,9	6
50	2,71	0,71	26,04	1,9	5,5
51	3,69	0,65	17,68	2,5	5

Coletor	Média	Desvio Padrão	Coeficiente de Variação	Mínimo	Máximo
52	3,79	0,62	16,45	2,6	5
53	3,81	0,59	15,36	3	5
54	3,51	0,72	20,46	2,2	5
55	3,48	0,78	22,40	2	5,8
56	3,42	0,87	25,37	2	6
57	3,17	0,80	25,38	2	6
58	3,04	0,77	25,38	2	6
59	2,80	0,83	29,62	1,6	6
60	2,61	0,76	29,35	1,2	5,2
61	3,68	0,76	20,79	2,5	5
62	3,79	0,73	19,16	2,2	5
63	3,73	0,71	18,95	2	5,1
64	3,75	0,68	18,16	2,1	5,2
65	3,51	0,78	22,24	2	5,8
66	3,38	0,82	24,41	2	6
67	3,30	0,93	28,09	2	6
68	3,12	0,90	28,89	1,8	6
69	2,98	0,89	29,89	1,5	6
70	2,98	0,92	30,94	1,2	6
71	3,91	0,75	19,09	2,5	5
72	3,91	0,78	19,83	2,5	5,5
73	3,84	0,87	22,67	2	5,4
74	3,70	0,86	23,21	2	5,2
75	3,44	0,84	24,35	2	5,4
76	3,38	0,79	23,27	1,8	5,5
77	3,28	0,90	27,41	1,7	6
78	3,40	0,90	26,47	1,8	6
79	3,30	0,86	26,12	1,8	6
80	3,17	0,88	27,69	1,8	6
81	3,89	0,81	20,94	2,5	6
82	3,96	0,91	22,97	2,2	6
83	3,89	0,88	22,68	2	6
84	3,73	0,98	26,20	2	6
85	3,51	0,88	24,96	2	5
86	3,62	1,04	28,73	2	6
87	3,49	0,92	26,48	1,8	5
88	3,58	0,93	26,13	2	5
89	3,50	0,94	26,93	1,8	6
90	3,42	0,96	28,09	1,8	6
91	4,04	0,85	21,08	2,4	6
92	4,06	0,87	21,38	2,5	6
93	3,93	0,86	21,87	2,2	6
94	3,71	0,88	23,84	2	6
95	3,46	0,88	25,48	2	5,2
96	3,54	0,99	27,93	2	6
97	3,67	0,96	26,16	2	5
98	3,72	1,08	29,08	2	6
99	3,61	1,10	30,58	2	6
100	3,42	1,09	31,86	2	6