

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM COMPUTAÇÃO APLICADA**

MARIA CAROLINA DE OLIVEIRA

**INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DE LIMAR DE SEGMENTAÇÃO EM SISTEMAS DE
MENSURAÇÃO DE PARÂMETROS RADICULAR**

PONTA GROSSA

2020

MARIA CAROLINA DE OLIVEIRA

**INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DE LIMAR DE SEGMENTAÇÃO EM SISTEMAS DE
MENSURAÇÃO DE PARÂMETROS RADICULAR**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Computação Aplicada da Universidade Estadual de Ponta Grossa, como parte dos requisitos para obtenção do título de mestre em Computação Aplicada na Área de Modelagem Computacional Aplicada.

Orientador: Profa. Dra. Rosane Falate

PONTA GROSSA

2020

O48

Oliveira, Maria Carolina de

Influência da variação de limiar de segmentação em sistemas de mensuração de parâmetros radicular / Maria Carolina de Oliveira. Ponta Grossa, 2021.

141 f.

Dissertação (Mestrado em Computação Aplicada - Área de Concentração: Computação para Tecnologias em Agricultura), Universidade Estadual de Ponta Grossa.

Orientadora: Profa. Dra. Rosane Falate.

1. Medição de raízes. 2. Limiar. 3. Comprimento. 4. Milho. 5. WinRhizo. I. Falate, Rosane. II. Universidade Estadual de Ponta Grossa. Computação para Tecnologias em Agricultura. III.T.

CDD: 004



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA
Av. General Carlos Cavalcanti, 4748 - Bairro Uvaranas - CEP 84030-900 - Ponta Grossa - PR - <https://uepg.br>

TERMO

TERMO DE APROVAÇÃO

Maria Carolina de Oliveira

INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DE LIMAR DE SEGMENTAÇÃO EM SISTEMAS DE MENSURAÇÃO DE PARÂMETROS RADICULAR

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre no Programa de Pós-Graduação em Computação Aplicada da Universidade Estadual de Ponta Grossa, pela seguinte banca examinadora:

Profa. Dra. Rosane Falate

Profa. Dra. Mauren Louise Sguario Coelho de Andrade

Prof. Dr. Luciano José Senger

Ponta Grossa, 04 de dezembro de 2020.



Documento assinado eletronicamente por **MAUREN LOUISE SGUARIO COELHO DE ANDRADE, Usuário Externo**, em 04/12/2020, às 15:33, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



Documento assinado eletronicamente por **Rosane Falate, Professor(a)**, em 04/12/2020, às 15:36, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



Documento assinado eletronicamente por **Luciano Jose Senger, Professor(a)**, em 15/12/2020, às 15:17, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



A autenticidade do documento pode ser conferida no site <https://sei.uepg.br/autenticidade> informando o código verificador **0354001** e o código CRC **63785959**.

AGRADECIMENTOS

Ao longo do tempo que me dediquei ao mestrado, pensei em desistir várias vezes. Eu imaginava estar passando por dias difíceis até acontecer de fato um inconveniente, o qual me fez postergar a pesquisa para tratar da minha saúde.

Com isso, agradeço primeiramente pela sabedoria, paciência e força proveniente de Deus. Ele foi meu Pai, meu melhor amigo, a tradução do amor quando me senti sozinha. Agradeço a Ele por tantas bênçãos que talvez anteriormente eu não soubesse dar o real valor: minha vida, meu estudo, meu trabalho, minha família, meus amigos, e todos os momentos de alegria junto dos que amava.

Agradeço também aos meus pais, meus irmãos e família, pela educação e por me tornarem a mulher que sou. Em especial à minha mãe, Mariza, por seu cuidado, apoio, carinho e por ter um coração tão grande; e ao meu amado sobrinho Gustavo, que me pedia para sair do quarto para vê-lo andar de bicicleta quando eu estava bitolada no computador.

A todos os amigos que me ajudaram e me acolheram nas suas casas, este agradecimento se estende às suas famílias. Obrigada pela disponibilidade de tempo, amizade, e pela diversão nos momentos em que estivemos juntos.

Aos colegas de trabalho das instituições que atuei como servidora, obrigada por cobrirem os horários em que precisei me ausentar para cumprir meus deveres com o mestrado, pela paciência em dias que eu não estava produtiva e pelo exemplo de competência e amor pelo que fazem.

Aos professores Mauren Sguario e Luciano Senger pelas contribuições neste trabalho, Rosane Falate pela orientação; José Carlos, Elaine e Salete pelas conversas edificantes; e aos demais docentes que fizeram parte desta caminhada, agradeço pelo conhecimento repassado, compreensão e incentivo.

Finalmente, agradeço a todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação.

*Consagre ao Senhor tudo o que você faz,
e os seus planos serão bem-sucedidos.*

Provérbios 16:3

RESUMO

Na agronomia, a mensuração do comprimento, diâmetro e volume do sistema radicular serve para indicar se o cultivo está se desenvolvendo conforme o previsto, e auxiliar na decisão da aplicação de insumos no solo viabilizando melhorar a saúde e a produtividade do cultivo. No entanto, essa medição deve ser minuciosa desde a separação das amostras, aquisição das imagens e utilização do software. O maior desafio computacional nesse caso é a automatização para a separação das raízes do fundo da imagem. A maioria dos softwares existentes fornecem melhores resultados quando o usuário participa desse processo definindo os parâmetros, como o limiar. O trabalho proposto avalia a sensibilidade dos softwares WinRhizo, RoMe e TMM na variação do limiar, e tem por objetivo indicar a faixa de limiar adequado para imagens de raízes de milho adquiridas pelo escâner Epson Perfection V700 Photo, em 300dpi, com a tampa aberta, em modo colorido, profissional, formato BMP. Primeiramente os softwares foram testados com amostras de fios de náilon a fim de aferir sua acurácia. As amostras dos fios foram testadas com valores de limiar de 0 a 255 intervalados em 11 unidades, sendo elencando o limiar com menor erro relativo percentual médio ($\overline{ERP}$) para ser variado em 5 unidades acima e abaixo. No caso de amostras de fios de náilon, o limiar 25 foi o de melhor desempenho para os sistemas TMM e WinRhizo, com $\overline{ERP}$ de 3,99% e 4,12%, respectivamente, e o 21 para o sistema RoMe, com $\overline{ERP}$ de 69,72%. Aplicando esses limiares para medir raízes de milho, obteve-se $\overline{ERPs}$ acima de 48% para os três sistemas, inviabilizando utilizar estes limiares como referência para raízes. Repetindo-se o procedimento para encontrar o limiar adequado para as raízes lavadas de milho, obteve-se $\overline{ERPs}$ de 13%, 17% e 34% com os valores de limiares 42, 43 e 28, respectivamente para os sistemas WinRhizo, TMM e RoMe. Entretanto, observados os coeficientes de determinação (R^2) e o desvio padrão (DP) juntamente com os $\overline{ERPs}$ resultantes, a análise conclusiva foi a definição de uma faixa de limiares adequada para os três sistemas. Para medição de raízes, com DP abaixo de 15%, $\overline{ERPs}$ abaixo de 20%, e R^2 variando entre 0,933 a 0,965, a faixa de limiar entre 34 e 44 foi definida como adequada para o sistema WinRhizo. Para o sistema TMM, mantendo o mesmo DP e $\overline{ERPs}$ anteriores, mas com coeficientes de determinação de 0,943 e 0,967, os valores adequados de limiares são 25, 34, e 41 a 43. Para o sistema RoMe, a faixa de limiares adequados elencada foi a com $\overline{ERPs}$ até 35%: 29 a 30, com DP próximo de 20% e R^2 por volta de 0,82.

Palavras-Chave: Medição de raízes. Limiar. Comprimento. Milho. WinRhizo. TMM. RoMe.

ABSTRACT

In agronomy, measuring length, diameter and volume of the root system serves to indicate whether the crop is developing as planned, and to assist in the decision to apply fertilizers to the soil, making it possible to improve the health and productivity of the crop. However, this measurement must be meticulous since the separation of the samples, acquisition of the images and use of the software. The biggest computational challenge in this case is automation for separating the roots from the background of the image. Most existing software provides better results when the user participates in this process by setting the parameters, such as the threshold. The proposed work evaluates the sensitivity of the WinRhizo, RoMe and TMM software in the threshold variation, and aims to indicate the best threshold value for images of corn roots acquired by the scanner Epson Perfection V700 Photo, at 300 dpi, with the lid open, in colorful, professional mode, BMP format. First, the software was tested with nylon yarn images. They were tested with threshold values from 0 to 255 interval in 11 units, listing the mean relative error ($\overline{RE}$) with the best results to be varied in 5 units above and below. The threshold value of 25 was the one with the best performance for the TMM and WinRhizo systems, and the value of 21 for the RoMe system. The $\overline{RE}$ of the WinRhizo, TMM and RoMe systems, for these threshold values were 3.99%, 4.12% and 69.72%, respectively. Applying this value to measure corn root images, $\overline{RE}$ s of 49%, 79% and 87% were obtained for the WinRhizo, RoMe and TMM systems respectively. Repeating the procedure to find the best threshold value for the washed roots, $\overline{RE}$ s of 13%, 17% and 34% were obtained with threshold values 42, 43 and 28, respectively for WinRhizo, TMM and RoMe systems. However, observing the determination coefficients (R^2) and the standard deviation (SD) with the resulting $\overline{RE}$ s, the conclusive analysis was the definition of an appropriate range of thresholds for the three systems. For root measurement, with $SD < 15\%$, $\overline{RE} < 20\%$, and R^2 ranging from 0.933 to 0.965, the threshold range between 34 and 44 was defined as appropriate for the WinRhizo system. For the TMM system, for the same SD and $\overline{RE}$ as before, but with R^2 of 0.943 and 0.967, the appropriate threshold values are 25, 34, and 41 to 43. For the RoMe system, the threshold range adequate was listed with $\overline{RE}s < 35\%$: 29 to 30, with approximately $SD = 20\%$, and $R^2 = 0.82$.

Keywords: Root Measurement. Threshold. Length. Corn. WinRhizo. TMM. RoMe.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Etapas do PDI.....	20
Figura 2 - Vizinhança entre pixels.	21
Figura 3 - Histograma de uma imagem em cinza.....	22
Figura 4 – Distinção do fundo pela seleção de tons de cinza através do histograma.....	23
Figura 5 - Histograma de uma imagem (a), e (b) após aplicar a limiarização conforme T	24
Figura 6 – Limiarização manual global(a), por entropia(b) e K-médias(c)	27
Figura 7 - Imagens resultantes da subtração entre: (a) limiarização manual global e por entropia, (b) limiarização por entropia e K-médias.	28
Figura 8 - Algoritmo de afinamento desenvolvido por Maruyama (2016)	29
Figura 9 - 8-vizinhança usada para o processo de afinamento	30
Figura 10 – Raízes de milho com 2,7 metros de profundidade.	33
Figura 11 – Raízes de milho com profundidade inferior a um metro.	33
Figura 12 - Utilização do pincel para remoção de partes da imagem na análise	38
Figura 13 – Divisão da imagem de raiz para segmentação utilizando <i>triangle method</i>	40
Figura 14 - Definição do limiar e outros parâmetros de análise no WinRhizo	47
Figura 15 - Imagem de raízes após processada pelo WinRhizo	48
Figura 16 - Imagem de raiz carregada no sistema RoMe	49
Figura 17 - Importação de imagem no sistema TMM	50
Figura 18 - Definição de limiar através da barra inferior, e histograma da imagem da raiz no sistema TMM.	50
Figura 19 - Tabela de resultados de uma análise de raiz pelo sistema TMM.....	51
Figura 20 – Imagem da amostra nº 2 de fios de náilon	54

Figura 21 – Imagem de amostra de raiz de milho lavada.....	55
Figura 22 - Amostra 31 limiarizada com o valor de limiar: (a) 23 e (b) 45.	69
Figura 23 – Histogramas das imagens das amostras: (a) 13 e (b) 31.....	70
Figura 24. Escâner com as molduras de isopor e bandeja posicionada contendo amostra de uma raiz.....	140

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – ERP x Amostra para os limiares 12, 23 e 34.	62
Gráfico 2 – ERP x Amostra para os limiares 23, 25 e 27.	64
Gráfico 3 – Variação do ERP médio para segunda fase das medições de fios de náilon.....	67
Gráfico 4 – ERP e seu DP para limiares no sistema WinRhizo em medições de fios de náilon	74
Gráfico 5 - ERP e seu DP para limiares no sistema TMM em medições de fios de náilon.....	74
Gráfico 6 - ERP e seu DP para limiares no sistema RoMe em medições de fios de náilon.....	75
Gráfico 7 – Análise de regressão para limiares 21 a 27 nos softwares WinRhizo e TMM.	76
Gráfico 8 – Variação do ERP médio para segunda fase das medições de raízes	81
Gráfico 9 - ERP e seu DP para limiares no sistema WinRhizo em medições de raízes	84
Gráfico 10 - ERP e seu DP para limiares no sistema TMM em medições de raízes	84
Gráfico 11 - ERP e seu DP para limiares no sistema RoMe em medições de raízes	85

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Métodos computacionais para a determinação de parâmetros radiculares.....	45
Quadro 2 - Exemplo de quadro de análise dos limiares para um determinado sistema.....	57
Quadro 3 - Análise do ERP médio dos limiares testados no sistema WinRhizo	63
Quadro 4 - Valores obtidos para o ERP médio dos limiares testados na segunda fase no sistema WinRhizo.	63
Quadro 5 - Análise do ERP médio dos limiares testados no sistema RoMe, sendo (a) os resultados considerando a amostras 31 a 34, e (b) desconsiderando as amostras 31 a 34.....	65
Quadro 6 - Análise do ERP médio dos limiares testados na segunda fase no sistema RoMe	65
Quadro 7 - Análise do ERP médio dos limiares testados no sistema TMM, sendo (a) os resultados considerando a amostras 31 a 34, e (b) desconsiderando as amostras 31 a 34.....	66
Quadro 8 - Análise do ERP médio dos limiares testados na segunda fase no sistema TMM.....	66
Quadro 9 – ERP médio dos limiares testados no sistema WinRhizo para amostras 31 a 34.....	69
Quadro 10 – ERP médio dos limiares testados no sistema RoMe para amostras 31 a 34	71
Quadro 11 - ERP médio dos limiares testados no sistema TMM para amostras 31 a 34	71
Quadro 12 – ERP médio, desvio padrão (DP) e coeficiente de determinação (R^2) para limiares testados com fios de náilon	73
Quadro 13 - ERP médio dos limiares para amostras de raízes de milho no sistema WinRhizo.....	78
Quadro 14- ERP médio dos limiares para amostras de raízes de milho no sistema WinRhizo.....	78

Quadro 15- ERP médio dos limares para amostras de raízes de milho no sistema RoMe	79
Quadro 16 - ERP médio dos limares para amostras de raízes de milho no sistema RoMe	79
Quadro 17 - ERP médio dos limares para amostras de raízes de milho no sistema TMM.....	80
Quadro 18 - ERP médio dos limares para amostras de raízes de milho no sistema TMM.....	80
Quadro 19 – ERP médio, desvio padrão (DP) e coeficiente de determinação (R^2) para limiões testados com raízes de milho no WinRhizo(W) e TMM(T).....	83
Quadro 20 - ERP médio, desvio padrão (DP) e coeficiente de determinação (R^2) para limiões testados com raízes de milho no RoMe(R).....	83
Quadro 21 - Resultados da primeira fase de medições de fios de náilon no sistema WinRhizo.....	96
Quadro 22- Resultados da segunda fase de medições de fios de náilon no sistema WinRhizo.....	99
Quadro 23- Resultados da primeira fase de medições de fios de náilon no sistema RoMe	103
Quadro 24- Resultados da segunda fase de medições de fios de náilon no sistema RoMe	108
Quadro 25 - Resultados da primeira fase de medições de fios de náilon no sistema TMM.....	112
Quadro 26 - Resultados da segunda fase de medições de fios de náilon no sistema TMM.....	115
Quadro 27- Resultados da primeira fase de medições de raízes no sistema WinRhizo	119
Quadro 28- Resultados da segunda fase de medições de raízes no sistema WinRhizo	121
Quadro 29- Resultados da primeira fase de medições de raízes no sistema RoMe.....	126
Quadro 30 - Resultados da segunda fase de medições de raízes no sistema RoMe.....	130

Quadro 31- Resultados da primeira fase de medições de raízes no sistema
TMM 135

Quadro 32 - Resultados da segunda fase de medições de raízes no sistema
TMM 136

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BMP	<i>Bitmap</i>
CV	Coeficiente de Variação
DP	Desvio Padrão
JPEG	<i>Joint Pictures Expert Group</i>
PDI	Processamento Digital de Imagens
PER	Percentual de Erro Relativo
SPD	Sistema de Plantio Direto
USB	<i>Universal Serial Bus</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 OBJETIVOS	17
1.2 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO.....	18
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	19
2.1 PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS	19
2.1.1 Pixel, vizinhança, conectividade e distância entre pixels.....	20
2.1.2 Histograma	21
2.1.3 Segmentação	24
2.1.4 Afinamento	28
2.2 COMPRIMENTO RADICULAR.....	31
2.3 COMPRIMENTO RADICULAR DA CULTURA DO MILHO	32
3 ESTADO DA ARTE	35
3.1 SISTEMAS AUTOMATIZADOS NA MEDIÇÃO DE RAÍZES	35
3.2 SISTEMAS WINRHIZO, ROME E TMM	47
3.2.1 WinRhizo	47
3.2.2 RoMe.....	48
3.2.3 TMM	49
4 METODOLOGIA	52
4.1 MATERIAIS	52
4.1.1 Imagens de fios de náilon.....	52
4.1.2 Imagens de raízes.....	54
4.1.3 Hardware e software para execução dos sistemas	55
4.2 LIMIAZIZAÇÃO NOS SISTEMAS WINRHIZO, ROME E TMM	56
4.2.1 Determinação do limiar adequado com base em imagens de fios de náilon....	56
4.2.2 Variação do limiar para amostras de imagens de raízes de milho lavadas	59
5 RESULTADOS.....	61
5.1 FIOS DE NÁILON	61
5.1.1 Resultados no sistema WinRhizo	62
5.1.2 Resultados no sistema RoMe.....	64
5.1.3 Resultados no sistema TMM	66
5.1.4 Sensibilidade dos softwares WinRhizo, RoMe e TMM para fios de náilon	67
5.1.5 Amostras 31 a 34	68
5.1.6 Análise do desvio padrão e do coeficiente de determinação.....	71
5.2 RAÍZES.....	77
5.2.1 Resultados no sistema WinRhizo.....	77
5.2.2 Resultados no sistema RoMe.....	78
5.2.3 Resultados no sistema TMM	79
5.2.4 Sensibilidade dos softwares WinRhizo, RoMe e TMM para raízes	80
5.2.5 Análise do desvio padrão e do coeficiente de determinação.....	82

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	87
6.1 TRABALHOS FUTUROS	89
REFERÊNCIAS.....	90
APÊNDICE A – MEDIDAS DE FIOS DE NAILON NO SISTEMA WINRHIZO.....	95
APÊNDICE B – MEDIDAS DE FIOS DE NAILON NO SISTEMA ROME	102
APÊNDICE C - MEDIDAS DE FIOS DE NAILON NO SISTEMA TMM	111
APÊNDICE D - MEDIDAS DE RAÍZES NO SISTEMA WINRHIZO	118
APÊNDICE E - MEDIDAS DE RAÍZES NO SISTEMA ROME.....	125
APÊNDICE E - MEDIDAS DE RAÍZES NO SISTEMA TMM	134
ANEXO A – MÉTODO DE AQUISIÇÃO DAS IMAGENS DE RAÍZES	140

1 INTRODUÇÃO

A análise do sistema radicular da planta é utilizada para investigar a influência dos fatores ambientais no desenvolvimento de determinada cultura. O crescimento e a distribuição radicular normalmente são avaliados utilizando a massa, número de raízes, área, volume, comprimento e diâmetro médio, sendo estes os principais parâmetros (BÖHM, 1979).

No estudo de raízes, o comprimento é o parâmetro de maior importância. Além de servir de base para os outros parâmetros, o comprimento é utilizado para prever a maneira em que um sistema radicular se adapta a alterações no ambiente em que se insere, devido a sua associação com a disponibilidade de nutrientes e de água presentes no solo (MAGALHÃES; DURÃES, 2006; WASSON *et al.*, 2012).

O comprimento radicular pode ser mensurado de maneira clássica através do método da linha de intersecção (NEWMAN, 1966). Esse método é baseado em uma relação adaptada para quantificação do comprimento de raízes utilizando um sistema em grades (TENNANT, 1975) conhecido como o Método de Tennant, e trata da relação matemática entre o comprimento de segmentos de raízes e o número de intersecções em linhas retas orientadas aleatoriamente.

O Método de Tennant é exaustivo e, apesar de ser tradicional na área agrônômica, sua medição pode resultar em falhas, visto que é um trabalho manual e depende da atenção de quem está realizando a medida. Devido a esses fatos, sistemas automatizados para avaliação de sistemas radiculares surgiram como alternativa ao Método de Tennant (WINRHIZO, 2019; MARUYAMA, 2016; NAME, 2013).

Os sistemas automatizados ou semiautomatizados se baseiam no processamento digital de imagens. Em alguns desses, é realizada a leitura de uma raiz através de escâner (RICHARDS *et al.*, 1979), em outros, apenas a imagem da raiz é submetida ao sistema (NAME, 2013). Entre os sistemas de livre acesso pode-se citar o Safira (JORGE; RODRIGUES, 2008), RoMe (NAME, 2013), TMM (MARUYAMA, 2016), e MARIA-J (LOBET G. *et al.*, 2017). Entre os sistemas comerciais, o software de referência na área agrônômica para efetuar as medições de parâmetros radicular é o WinRhizo (WHINRIZO, 2019).

Todavia, a falta de objetividade na interatividade com o usuário em todos

esses sistemas, o excesso de funções e/ou manipulação das imagens podendo alterar o resultado final, a filtragem e a eliminação de uma grande área de pixels por padrão, resultam em limitações e variações nas análises de raízes (NAME, 2013).

A definição do valor de limiar na análise de raízes é um dos parâmetros comum a todos os sistemas de medição. Esse parâmetro, para imagens em tons de cinza, varia de 0 a 255, e define quais pixels são considerados para os cálculos dos parâmetros radiculares, pois separa o que é raiz e o que é o fundo da imagem.

No entanto, o valor do limiar varia de acordo com as raízes que estão sendo medidas, imagens utilizadas e suas condições de brilho e cor. Assim, a acurácia do resultado fica subjetiva ao limiar definido pelo usuário.

Este trabalho tem por finalidade avaliar e encontrar um intervalo de valores adequados para o parâmetro de limiar na estimativa do comprimento de objetos conhecidos, e de raízes de milho lavadas, para o sistema comercial WinRhizo (WHINRIZO, 2019), e os sistemas livres TMM (MARUYAMA, 2016) e RoMe (NAME, 2013), e comparar a sensibilidade de cada um na alteração deste parâmetro.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo desta dissertação é comparar os sistemas de medição de parâmetros radiculares WinRhizo, RoMe e TMM com relação ao parâmetro ou valor de limiar, verificando sua influência na acurácia da medida de comprimento de imagens de fios de náilon e de raízes de milho lavadas.

Os objetivos específicos são os que seguem:

- a) Determinar o parâmetro ou valor de limiar adequado de análise de cada sistema para amostras de fios de náilon e de raízes de milho lavadas, a partir de imagens obtidas com o escâner Epson Perfection V700 Photo, em 300dpi, com a tampa aberta, em modo colorido, profissional, formato BMP;
- b) Analisar a acurácia nas medidas de comprimento de imagens de raízes de milho lavadas, aplicando o limiar adequado de fios de náilon obtido para cada sistema;
- c) Verificar a sensibilidade do parâmetro de limiar de cada sistema, quando da medida de comprimento, realizando variações pré-estabelecidas para análise de imagens de fios de náilon e de raízes de milho lavadas;

- d) Comparar as medidas de comprimento resultantes dos sistemas com medidas obtidas de maneira manual (para fios de náilon) ou pelo método de Tennant (para as raízes lavadas), através erro relativo percentual (ERP).

1.2 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Este trabalho está organizado em seis Capítulos, sendo a presente introdução o Capítulo 1. O Capítulo 2 apresenta o marco teórico sobre os temas envolvidos nesta pesquisa. O Capítulo 3 detalha o estado da arte da medição de raízes. O Capítulo 4 descreve a metodologia para os testes nos sistemas de mensuração. O Capítulo 5 apresenta os resultados, e, por fim, no Capítulo 6 estão as considerações finais desta dissertação, além de trabalhos futuros sugeridos para a continuidade desta pesquisa.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Este Capítulo apresenta o referencial teórico da pesquisa e tem por objetivo descrever os conceitos teóricos acerca do trabalho. Na Seção 2.1 são apresentados aspectos gerais relacionados ao processamento digital de imagens. Na Seção 2.2 é comentado sobre parâmetros radiculares. Por fim, na Seção 2.3 estão descritas as características sobre o comprimento radicular da cultura do milho.

2.1 PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS

Processamento Digital de Imagens (PDI) é uma área de conhecimento cujo interesse é proveniente de suas aplicações. Entre elas, podem-se citar a extração automática de informações contidas em uma imagem e o aprimoramento de informações visuais, facilitando a interpretação humana (MARQUES FILHO; VIEIRA NETO, 1999).

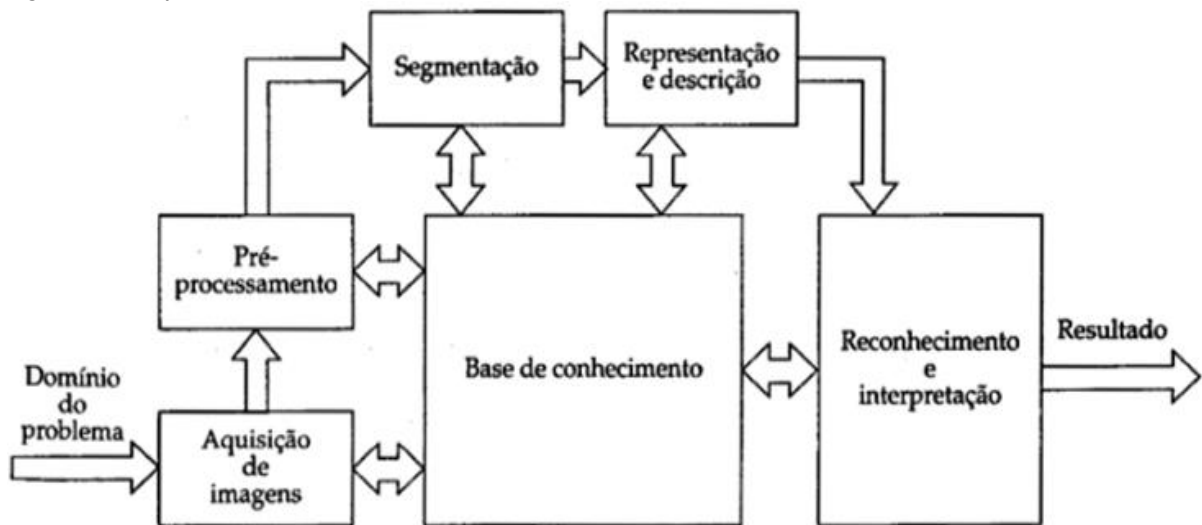
O PDI pode ser dividido em várias etapas, tais como: (i) aquisição, sendo a primeira, onde sensores obtêm imagens que serão digitalizadas; (ii) o pré-processamento, que faz o tratamento da imagem, facilitando a execução das etapas posteriores; (iii) a representação, responsável por organizar a informação de maneira apropriada para ser usada em processamentos futuros; (iv) a descrição, etapa em que características são denominadas e diferenças entre objetos na imagem são evidenciadas; (v) o reconhecimento, onde objetos são rotulados fazendo uso de suas descrições; e, por fim, (vi) a interpretação, onde as informações adquiridas são estudadas e significados são atribuídos (GONZALEZ; WOODS, 2000).

A Figura 1 representa as etapas e a relação entre elas. As informações geradas durante as etapas são armazenadas em uma base de conhecimento, que varia em tamanho e complexidade, dependendo da natureza do problema a ser solucionado via PDI (NAME, 2013).

Uma imagem pode ser representada através de uma matriz (x,y) , onde os índices de cada plano representam um ponto na imagem, e, no caso de uma imagem monocromática, os valores em cada ponto (x,y) representam a intensidade luminosa, também chamada de nível de cinza (MARQUES FILHO; VIEIRA NETO,

1999; GONZALEZ; WOODS, 2000).

Figura 1 - Etapas do PDI



Fonte: Gonzalez e Woods (2000)

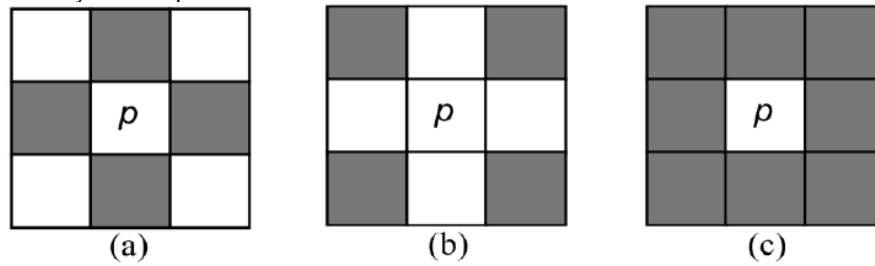
Os menores elementos capazes de constituir uma imagem são chamados de pixels. Os pixels, em imagens em tons de cinza, obedecem a uma escala de 8 bits, que representam valores de zero a 255. O valor zero representa preto, e 255 representa branco (MARQUES FILHO; VIEIRA NETO, 1999; GONZALEZ; WOODS, 2000).

Imagens coloridas, por outro lado, não são representadas dessa maneira, sendo constituídas por diversos canais de cores, cada um recebendo uma matriz própria (MARQUES FILHO; VIEIRA NETO, 1999; GONZALEZ; WOODS, 2000).

2.1.1 Pixel, vizinhança, conectividade e distância entre pixels

Pixels (*picture elements* – elementos da imagem), p , os menores elementos que compõem uma imagem, dão base para os conceitos de vizinhança, conectividade e cálculo de distância. Vizinhança entre pixels pode ser definida de 3 maneiras diferentes (Figura 2): (a) a 4-vizinhança, composta pelos quatro pixels em volta do pixel referência, no mesmo eixo horizontal e vertical; (b) a vizinhança diagonal, que é composta pelos pontos mais próximos em cada diagonal; (c) e a 8-vizinhança, que é composta pela união das duas vizinhanças anteriores (MARQUES FILHO; VIEIRA NETO, 1999).

Figura 2 - Vizinhaça entre pixels.



Fonte: Marques Filho e Vieira Neto (1999)

Conectividade é o conceito usado para definir bordas de objetos ou regiões de uma imagem, onde pixels são considerados conectados se forem vizinhos e atenderem alguma condição de similaridade (MARQUES FILHO; VIEIRA NETO, 1999).

O cálculo de distância nada mais é que a obtenção da distância Euclidiana entre dois pixels, que pode ser determinada pela Equação (1), onde $D_e(p, q)$ é a distância Euclidiana entre os pixels $p(x, y)$ e $q(s, t)$, e x, y, s e t são elementos dos pares ordenados (x, y) e (s, t) :

$$D_e(p, q) = [(x - s)^2 + (y - t)^2]^{1/2} \quad (1)$$

2.1.2 Histograma

Uma imagem digital pode ser compreendida como uma matriz, onde os índices de linhas e de colunas identificam um ponto, pixel, na imagem através de suas coordenadas. Cada pixel possui um valor correspondente ao nível de cinza ou à cor (GONZALEZ; WOODS, 2000).

A distribuição de intensidade de pixels em uma imagem digital pode ser representada por um histograma, ferramenta útil para extrair informações globais sobre a figura estudada, auxiliando no seu processamento (IMADA, 2014).

O cálculo do histograma compreende na Equação (2), onde r representa os níveis de intensidade na escala de cor; n_r é o número de pixels com o nível de intensidade r , e n_t é o número total de pixels da imagem (GONZALEZ; WOODS, 2000 *apud* DELBEM, 2010) :

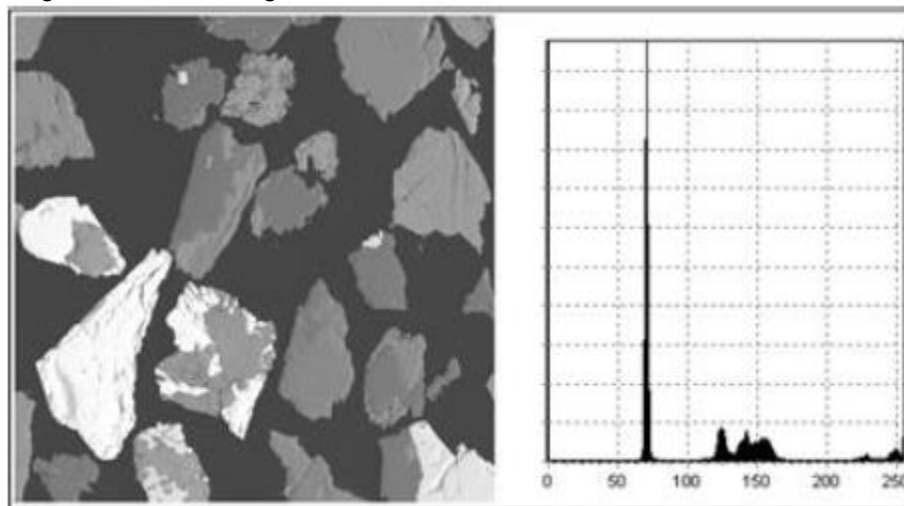
$$p(r) = \frac{n_r}{n_t} \quad (2)$$

O histograma também cumpre papel importante na etapa de segmentação, visto que os picos de intensidade correspondem às fases presentes, permitindo sua separação e/ou quantificação (LOPES, 2003).

O gráfico de um histograma é plotado no eixo das abscissas pela variação dos tons, e no eixo das ordenadas pela probabilidade de frequência em que estes tons podem aparecer na imagem. Para imagens monocromáticas de oito bits, os tons podem variar de 0 a 255, por exemplo, e em imagens coloridas é possível ter canais com faixas de cores, como RGB (*red, green blue*) – vermelho, verde e azul (GONZALEZ; WOODS, 2000).

A Figura 3 apresenta um histograma unidimensional para uma imagem monocromática em 8 bits.

Figura 3 - Histograma de uma imagem em cinza



Fonte: Delbem (2010)

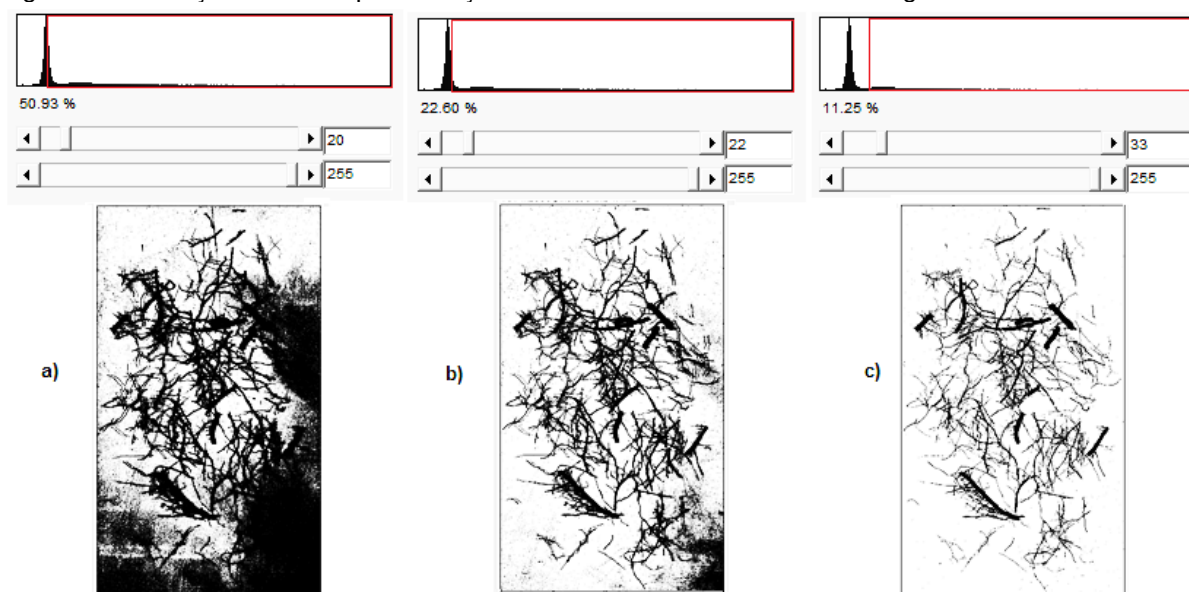
Pode ser observado que a maior concentração dos pixels que compõem a imagem está entre os níveis de cinza mais escuro, de 50 a 100. Em menores proporções, há concentrações de pixels com níveis próximos entre 120 a 175, e os mais próximos da cor branca acima de 200 (DELBEM, 2010).

Dessa forma, mesmo que o histograma seja apenas uma representação de como a imagem é formada e nada revele sobre seu conteúdo - no sentido de identificar se é uma imagem de uma maçã ou de um dia ensolarado, por exemplo, seu formato pode trazer informações de grande importância para a análise da imagem (GONZALEZ; WOODS, 2002).

A Figura 4 exemplifica a escolha manual dos valores de cinza, com base no

histograma, para a separação visual do fundo da imagem de uma raiz de milho, utilizando o software Image J, após a transformação da imagem em 8-bits. Para a Figura 4(a), foi escolhido a faixa de cinza de 20 a 255; para a Figura 4(b) de 22 a 255, e para a Figura 4(c) de 33 a 255.

Figura 4 – Distinção do fundo pela seleção de tons de cinza através do histograma



Fonte: O autor

Pode-se perceber que, para a mesma imagem, entre os níveis 20 a 255 estão 51% dos seus pixels, Figura 4 (a). Variando apenas dois níveis acima, é possível, mesmo que com ruído, chegar mais próximo da identificação do objeto alvo, sendo que estes pixels representam um pouco mais de 22% da imagem, Figura 4 (b). Por fim, entre os níveis 33 a 255 estão 11,25% dos pixels da imagem, que representam a raiz de milho a ser medida, Figura 4 (c).

A Figura 4 também exemplifica a dificuldade da área de PDI para solução automática de medição de raízes, tarefa que necessita da seleção do objeto alvo para então, a partir de técnicas computacionais sobre o posicionamento e disposição dos pixels, extrair em informações como comprimento, diâmetro e volume - parâmetros radiculares importantes utilizados na agronomia.

O maior problema é a sensibilidade da variação da escala de cores da imagem e seu cuidado no momento da aquisição, bem como o formato das raízes. Enquanto se diminui o ruído, informações sobre as raízes – aqui tratado como os pixels do objeto alvo - também podem ser desconsideradas, principalmente das mais

finas, como pode ser notado no canto superior direito entre (b) e (c) da Figura 4.

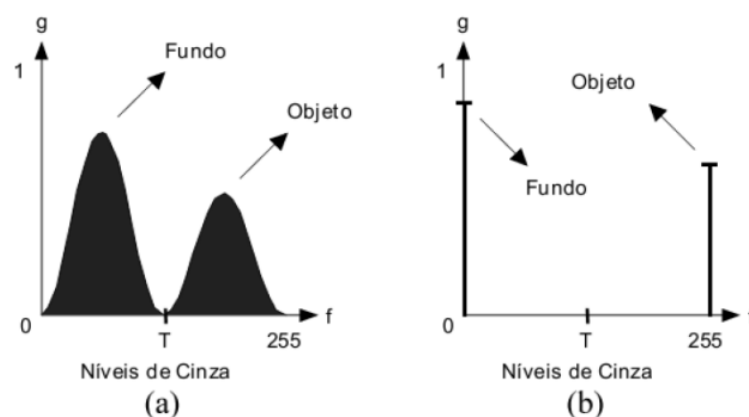
De qualquer modo, nota-se a importância do histograma, pois facilita a escolha de um valor - adiante chamado de limiar - nesta escala de cinza (ou colorida) para a separação da imagem em grupos de pixels com as mesmas características, também conhecida como segmentação.

2.1.3 Segmentação

Segmentação é um processo importante no PDI, onde a figura é dividida em regiões que contêm os objetos para analisar e regiões com o restante da imagem, geralmente denominadas de objeto alvo (ou de interesse) e fundo, respectivamente. É uma etapa que requer cuidado e costuma determinar o êxito na análise de imagens (GONZALEZ; WOODS, 2000).

Em caso de imagens monocromáticas, a segmentação costuma ser aplicada através de checagens de similaridade ou descontinuidade (GONZALEZ; WOODS, 2000). A descontinuidade determina uma borda entre duas regiões, pois estas apresentam valores de níveis de cinza relativamente distintos. *Thresholding*, ou limiarização, é uma técnica que classifica objetos diferentes por meio de limites de valores de tons de cinza para objetos de cada tipo (GONZALEZ; WOODS, 2000).

Figura 5 - Histograma de uma imagem (a), e (b) após aplicar a limiarização conforme T



Fonte: Marques Filho e Vieira Neto (1999)

A Figura 5(a) apresenta o histograma de tons de cinza de uma imagem monocromática $f(x, y)$, onde o eixo f representa os tons variando entre 0 e 255, e o eixo g representa a probabilidade do tom ocorrer na imagem.

Nesse caso, conforme pode ser observado da Figura 5(a), tons de cinza mais escuros (próximos a zero) representam o fundo e tons de cinza mais claros (próximos a 255) representam o objeto alvo de estudo, e esta separação é tal que é possível dividir a imagem em duas classes por meio do histograma, a partir de um limiar T .

Este método que avalia todo o histograma da imagem para separar o objeto alvo do fundo também é conhecido como limiarização manual global. Para isso ele faz a seguinte decisão: caso o ponto (x, y) presente na imagem $f(x, y)$ tiver o tom de cinza maior que o limiar T e menor que o limite na escala de variação de cor (neste caso, 255), então ele faz parte do conjunto de interesse e recebe valor zero; caso contrário, o ponto faz parte do fundo, e recebe valor 255, Figura 5(b) (MARQUES FILHO; VIEIRA NETO, 1999).

A limiarização global permite resultados interessantes quando a iluminação da imagem é demasiada uniforme e as regiões de interesse, representadas pelos objetos, possuem uma notável diferença de intensidade do seu fundo (LOPES, 2003, p.14).

Lopes (2003 apud WESKA, 1978) classifica os métodos de limiarização com base na dependência do operador de limiar, sendo três grupos: global, local e dinâmico. Caso seja determinado usando apenas as intensidades é classificado como global, caso use as intensidades e alguma informação espacial da imagem é classificado como local, e caso utilize ambas as informações mais as coordenadas espaciais é classificado como dinâmico.

Segundo González (GONZALEZ; WOODS, 2000), a limiarização multiníveis é, no geral, mais trabalhosa que o limiar global, pela dificuldade em encontrar múltiplos limiares que determinem os objetos alvos, especialmente quando há vários grupos distintos na figura. Adicionalmente, o uso da limiarização multiníveis aumenta consideravelmente o tempo computacional despendido na determinação dos limiares. É mais trabalhoso e pode gerar resultados semelhantes aos obtidos com limiares globais (LOPES, 2003).

Há vários métodos para a definição do limiar, dentre eles pode-se citar o cálculo de entropia da imagem (KAPUR; SAHOO; WONG, 1985) e o método K-means (JAIN; MURTY; FLYNN, 1999).

No método da limiarização por entropia é realizado o cálculo do grau de desordem das cores dos pixels que compõem a imagem, onde se testa todos os

limiares possíveis e classifica os pixels em dois grupos de intensidades.

O primeiro grupo, com pixels de intensidade que vão de 0 a t , é populada segundo a Equação (3), a qual define o cálculo do histograma, enquanto a Equação (4) define os pixels de intensidade entre $t + 1$ até 255 para o segundo grupo. Nas fórmulas descritas, P_i representa o valor do pixel normalizado e P a soma dos P_i até determinado valor t . O valor final do limiar é definido usando o resultado máximo dentre a soma das entropias de cada iteração i .

$$H_{(a)} = - \sum_{i=1}^t \frac{P_i}{P_t} \ln \frac{P_i}{P_t} \quad (3)$$

$$H_{(b)} = - \sum_{i=t+1}^n \frac{P_i}{1-P_t} \ln \frac{P_i}{1-P_t} \quad (4)$$

O método conhecido como K-means ou K-médias (JAIN; MURTY; FLYNN, 1999) define o valor de limiar através de um critério de erro quadrático. Esse método agrupa elementos considerando sua semelhança, baseando-se em um valor de centroide. O número de grupos é o primeiro valor que deve ser definido. Na segmentação de uma imagem em escala RGB, por exemplo, cada canal de cor possui K grupos em que seus pixels P são distribuídos de maneira aleatória. Baseando-se na média aritmética que representa o centroide Q calculado para cada grupo, é feito o cálculo da distância Euclidiana entre P e Q dos n grupos do canal situado - Equação (5).

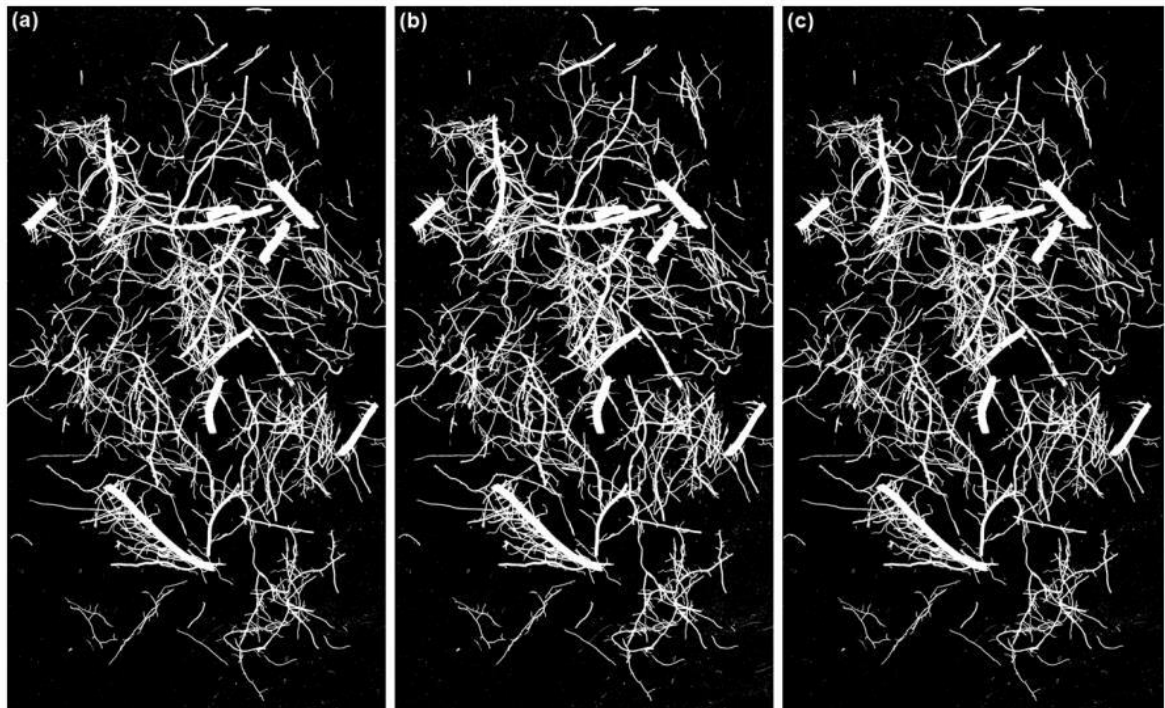
$$D = \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - Q_i)^2} \quad (5)$$

Após a definição de D , os pixels são então redistribuídos, sendo enviados para o grupo com a menor distância Euclidiana calculada entre o mesmo e o centroide. Esse processo repete-se a cada iteração i até que nenhum pixel precise ser movido, ou até que o erro quadrático apresente-se menor do que um valor já previamente definido (JAIN; MURTY; FLYNN, 1999, p. 278). Os pixels de cada grupo são então rotulados com uma cor diferente e a imagem segmentada é gerada.

A Figura 6 apresenta imagens resultantes da: (a) limiarização manual global,

(b) limiarização por entropia, e (c) da segmentação com dois grupos pelo método de K-médias; aplicados em uma imagem de raiz. De acordo com Oliveira (2017), imagens após a limiarização manual global e a limiarização K-médias apresentaram-se mais destacadas e com menos ruído.

Figura 6 – Limiarização manual global(a), por entropia(b) e K-médias(c)



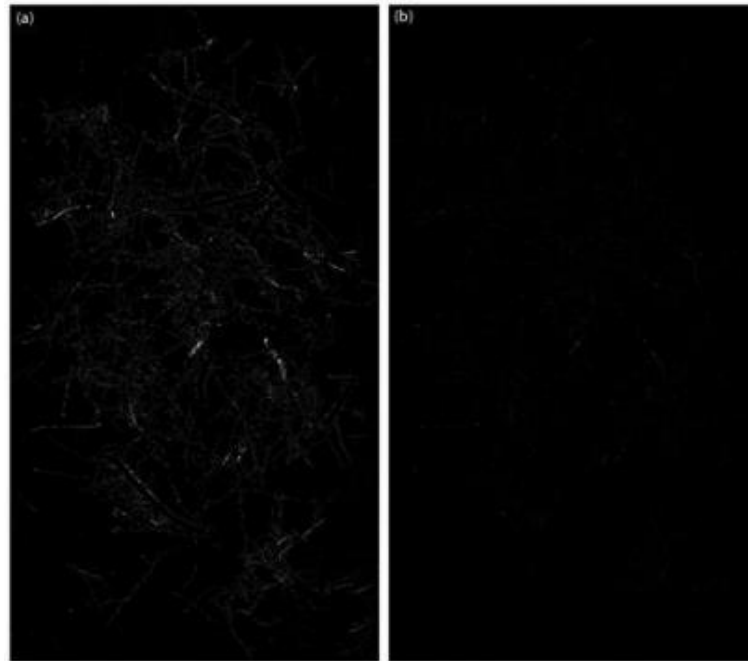
Fonte: Oliveira (2017)

Através da subtração das imagens pode-se facilitar a afirmação anterior. Na Figura 7 (a), Oliveira (2017) realizou a subtração entre o resultado da limiarização manual global e limiarização por entropia. Na Figura 7 (b), a subtração foi entre o resultado da limiarização por entropia e K-médias.

Pode-se perceber que ruídos apareceram mais na imagem resultante do algoritmo de limiarização por entropia do que na imagem resultante do algoritmo de K-médias, visto que através da contagem dos pixels brancos das imagens, obteve-se 49138 pixels brancos para o algoritmo do cálculo da entropia e 6368 para o K-médias (OLIVEIRA, 2017).

De fato, um problema crítico nas análises de imagens de raízes é com relação ao limiar, sendo que ele pode ser configurado para ser automático (dependendo do sistema utilizado), ou manual, onde o usuário/operador do sistema será responsável pela escolha do valor do limiar.

Figura 7 - Imagens resultantes da subtração entre: (a) limiarização manual global e por entropia, (b) limiarização por entropia e K-médias.



Fonte: Oliveira (2017)

A escolha de limiar de maneira automática eliminaria a subjetividade humana da análise, afetando a acurácia e a reprodutibilidade dos resultados (AUGUSTO, 2013). Entretanto, imagens com variações na luminosidade, por exemplo, causariam mudança no valor de limiar obtido de maneira automática. Por outro lado, o sistema pode adotar um limiar a partir de interpretação errada do que é raiz e o que é sombra e, neste caso, a utilização de limiar manual mostra-se mais coerente.

Com isso, os sistemas apresentam a possibilidade de configuração manual do limiar, podendo o usuário variar o seu valor, e permitindo a análise de resultados com valores de limiar diferentes. Nesse caso, é importante saber qual impacto nas respostas dos sistemas quando da variação do limiar manual, a partir de uma variação de situações que poderiam ser consideradas adequadas para análise.

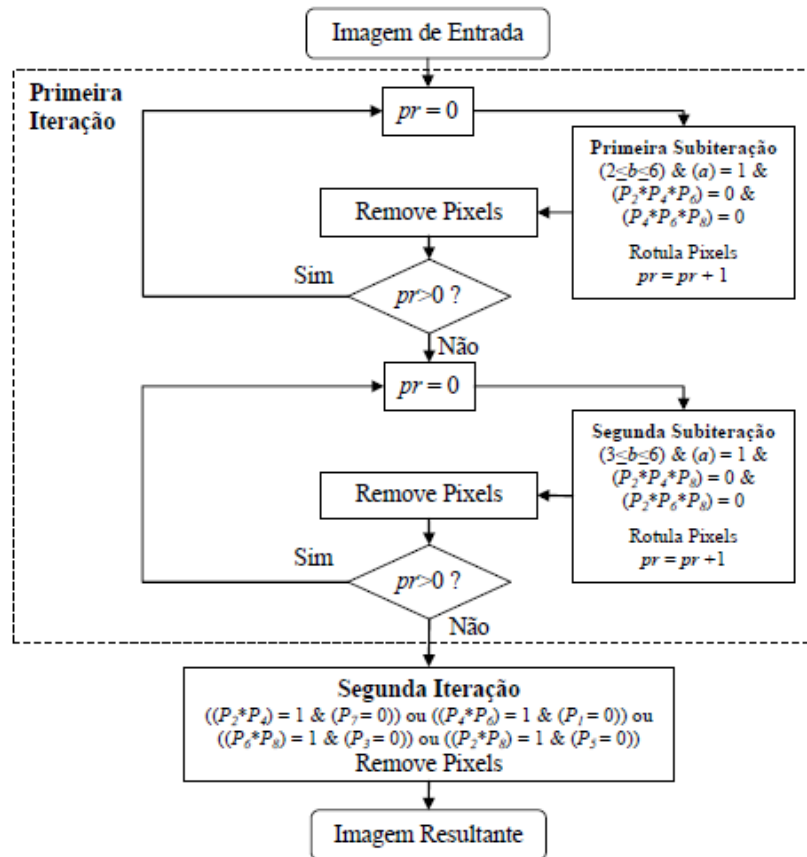
2.1.4 Afinamento

Em PDI, alguns algoritmos de afinamento ou esqueletização são utilizados para obtenção do esqueleto do objeto da imagem (MARQUES FILHO; VIEIRA NETO, 1999). Essa tarefa é computacionalmente custosa, mas possibilita a extração, e posteriormente a análise, por exemplo, do eixo principal dos objetos que

se deseja analisar na imagem. Entre os algoritmos de afinamento podem-se citar o multiescala, Zhang e Suen(1984), e Maruyama (2016).

A técnica de Maruyama (2016), em especial, faz uso dos conceitos apresentados nos algoritmos desenvolvidos por Kwon, Gi e Kang (2001, apud MARUYAMA, 2016) e Kwon (2013, apud MARUYAMA, 2016), para imagem binária ou em preto e branco, mas com modificações. Esse algoritmo (Figura 8) constitui-se de duas iterações, sendo que a primeira delas é também dividida em duas subiterações.

Figura 8 - Algoritmo de afinamento desenvolvido por Maruyama (2016)



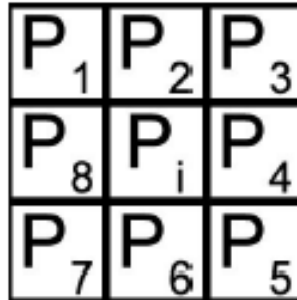
Fonte: Maruyama (2016)

A primeira subiteração encarrega-se de rotular os pixels que serão removidos, representado por p_r , quando os mesmos se adequam a algumas condições. Para a verificação do cumprimento das condições, considera-se a 8-vizinhança da Figura 9, com pixel central P_i (MARUYAMA, 2016).

O pixel P_i é o pixel que será removido caso as condições pré-estabelecidas sejam satisfeitas, ou seja, ele é o pixel candidato à remoção. O pixel P_i será rotulado

apenas se ele possuir de dois à seis pixels brancos b como vizinhos, e houver somente uma transição entre pixel preto e branco a na 8-vizinhança. Além disso, tanto o produto entre os pixels P_2, P_4 e P_6 quanto entre os pixels P_4, P_6 e P_8 devem resultar em zero. Os pixels rotulados anteriormente são removidos ao serem pintados da cor do fundo (MARUYAMA, 2016).

Figura 9 - 8-vizinhança usada para o processo de afinamento



Fonte: Maruyama (2016)

Durante a segunda subiteração rotulam-se também os pixels que satisfaçam algumas condições para futura remoção. Se rotulará o pixel P_i apenas se ele possuir de três à seis pixels brancos b como vizinhos, e houver somente uma transição entre pixel preto e branco a na 8-vizinhança. Além disso, o produto entre os pixels P_2, P_4 e P_6 deve resultar em zero, e o produto entre os pixels P_4, P_6 e P_8 também. Novamente, os pixels rotulados anteriormente são removidos ao serem pintados da cor do fundo (MARUYAMA, 2016).

Durante a segunda iteração, removem-se os pixels que satisfizerem algumas condições referentes à 8-vizinhança e aos respectivos valores; o pixel P_i somente será removido caso uma das seguintes condições seja satisfeita: se o produto entre os pixels P_2 e P_4 for igual à um, e o pixel P_7 for igual à zero; se o produto entre os pixels P_4 e P_6 for igual à um, e o pixel P_1 for igual à zero; se o produto entre os pixels P_6 e P_8 for igual à um, e o pixel P_3 for igual à zero ou se o produto entre os pixels P_2 e P_8 for igual à um e o pixel P_3 for igual à zero (MARUYAMA, 2016).

O processo de rotulação e remoção dos pixels é repetido até que não haja nenhum pixel removido P_r . No fim do processo, obtêm-se o esqueleto da raiz com espessura de apenas um pixel (MARUYAMA, 2016).

O processamento de imagem teve, nos últimos anos, vários avanços que

colaboraram para a análise de sistemas radiculares, tanto por meio de imagens tridimensionais quanto com imagens em duas dimensões. (RICHARDS *et al.*, 1979; LEBOWITZ, 1988; SMIT *et al.*, 1994; SMIT *et al.*, 2000; PIERRET *et al.*, 2013; NAME, 2013).

2.2 COMPRIMENTO RADICULAR

A análise de raízes é realizada por diversas razões, tais como verificação de sua importância ecológica, sua produção para alimentação, estudo de micro-organismos presentes no solo, além do entendimento de informações biológicas sobre plantas e como interagem com o ambiente (SMIT *et al.*, 2000).

Informações sobre o solo podem ser derivadas da observação do crescimento radicular de plantas. O nitrogênio, por exemplo, tem íntima ligação com o desenvolvimento de uma raiz, assim como a acidez do solo, causada pela presença de alumínio, e baixas concentrações de bases, ou mesmo a presença de herbicidas, que podem diminuir o crescimento da raiz e prejudicar seu desenvolvimento (MURAKAMI; YONEYAMA, 1988; CAIRES *et al.*, 2002; CAIRES *et al.*, 2001, NINOMIYA *et al.*, 2003).

A estrutura física do solo pode afetar como a raiz da planta se desenvolve, devido a fatores como compactação, dureza e tamanho dos poros. O uso de maquinário agrícola de grande porte, por exemplo, aumenta a compactação do solo, dificultando o crescimento da raiz (JIN *et al.*, 2013).

O comprimento é o parâmetro de maior importância, sendo ele utilizado para prever a maneira em que um sistema radicular se adapta a alterações no ambiente em que se insere, devido a sua associação com a disponibilidade de nutrientes e água presentes no solo (MAGALHÃES; DURÃES, 2006; WASSON *et al.*, 2012).

Newman (1966) reconheceu o tempo necessário para a medição do comprimento de raízes como a parte mais difícil. Então, propôs um meio de medição de comprimento de raízes, composto de diversas linhas retas, orientadas de maneira aleatória, em que, determinada a quantidade de interseções entre as linhas e os segmentos de raízes, e com o uso de relações matemáticas, era possível estimar o comprimento total.

Marsh (1971), baseado no trabalho de Newman (1966), utilizou em seus experimentos uma malha que seria usada para determinar o comprimento radicular

de maneira indireta. Tennant (1975) modificou e aprimorou o sistema proposto por Marsh (1971), desenvolvendo um método que se tornou padrão para a estimativa do comprimento de uma raiz, demonstrando variações de comprimento iguais ou inferiores a 5%.

O cálculo do comprimento da raiz, $C_{Tennant}$, é realizado através da Equação (6) (TENNANT, 1975):

$$C_{Tennant} = \frac{11}{14} \times N \times U \quad (6)$$

onde 11/14 é uma constante, N representa a quantidade de intersecções entre as raízes e as linhas verticais e horizontais da malha utilizada, sendo ela de 1 x 1 centímetro, e U corresponde a medida do lado do menor quadrado formado pela malha.

2.3 COMPRIMENTO RADICULAR DA CULTURA DO MILHO

De acordo com Tissi (2001), 85% do comprimento radicular da cultura do milho estão nos primeiros 20 cm de profundidade do solo, no sistema de plantio direto. Uma pesquisa similar realizada por Silva (2007) corroborou com o resultado de Tissi (2001), identificando 90% do comprimento presente na mesma profundidade.

No entanto, as raízes de milho podem chegar a 2,7 metros de profundidade, como demonstrado em um cultivo no sul do estado de Minas Gerais (REAGRO, 2018). Os pesquisadores abriram uma trincheira, lavaram o perfil do solo com água, aguardaram um dia para drenagem, e pintaram as raízes com tinta branca para melhor identificá-las na imagem, Figura 10.

Figura 10 – Raízes de milho com 2,7 metros de profundidade.



Fonte: Rehagro (2018)

Na Figura 11 é possível observar as raízes de milho deste mesmo caso de modo mais aproximado em profundidade inferior a um metro.

Figura 11 – Raízes de milho com profundidade inferior a um metro.



Fonte: Rehagro (2018)

Existem várias pesquisas relacionadas ao sistema radicular de plantas de milho, porém, são poucas as que indicam o comprimento radicular por planta, as quais podem ser observadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Comprimento radicular de plantas de milho

Híbridos de Milho	Referência	Intervalo Observado (m)	Média (m)
NE	Bhadoria et al. (2004)	25 - 1217	
Pioneer 3325	Buczko ,Kuchenbuch e Ingram (2006)	2,5 - 25	
478 Wu312	Liu et al. (2009)	45,55 - 103,31	
INRA MB 862	Redjala et al. (2011)	4,5 - 11,86	
Danyu 13			
Denghai 661			
Huang 417			
Jundan 20			14,36 – 238,23
Nongda 60			
Nongda 108			
Sthendan 7	Wu et al. (2011)	7,50 - 40	
Xianyu 335			
Yedan 13			
Zhengdan 958			
Zhongdan 2			
NE	Xia et al. (2013)	1,10 – 32,20	

Fonte: Maruyama (2016)

De acordo com a Tabela 1, a média apresentada dos intervalos encontrados para o comprimento radicular da planta de milho é 14,36 a 238,23 m.

3 ESTADO DA ARTE

Este Capítulo apresenta trabalhos relacionados à medição de raízes e seus respectivos resultados nos últimos anos. A Seção 3.1 demonstra a evolução das soluções de ferramentas automatizadas para tais medições. A Seção 3.2 descreve os sistemas WinRhizo, TMM e RoMe, considerando que a principal contribuição do estudo é comparar a sensibilidade da variação do limiar nestes softwares.

3.1 SISTEMAS AUTOMATIZADOS NA MEDIÇÃO DE RAÍZES

No decorrer de pesquisas, sistemas automatizados surgiram a partir do método da linha de intersecção (NEWMAN, 1966), Método de Tennant (TENNANT, 1975) e processamento digital de imagens, os quais estão citados nesta seção, em ordem cronológica.

Rowse e Philips (1974) são responsáveis por um desses sistemas, o qual era construído usando barras roscadas, motores, uma lâmpada de 6 V, um contador optoeletrônico e um microscópio binocular. O sistema requeria remoção manual de resíduos antes da realização da análise e tinha problemas em distinguir raízes que estivessem em contato uma com a outra.

Richards *et al.* (1979) desenvolveram um sistema que utilizava um escâner optoeletrônico para a medição de raízes, e obtiveram um erro relativo de 12% para o comprimento com relação ao método da linha de intersecção. Esse sistema era focado em identificar raízes de espessura entre 0,1 e 3 mm, sendo incapaz de identificá-las fora deste intervalo.

Lebowitz (1988) usou a análise de imagens para fazer a medição de raízes através fotografias de alto contraste. Essas imagens eram geradas em tons de cinza e o método de limiarização era utilizado para transformá-las em imagens monocromáticas (preto e branco). Esse método mostrou alto nível de sucesso, com taxas de erro consideravelmente baixas, em torno de 0,60% a 4,11%.

Um método semelhante foi utilizado por Zoon e Tienderen (1990), com a adição da possibilidade de ignorar objetos abaixo de um tamanho definido pelo usuário, ignorando impurezas durante a análise, além da estimativa da quantidade de pontas e ramificações. O coeficiente de variação obtido não excedeu 5%,

comparado ao Método de Tennant para a medida do comprimento das raízes.

Kirchhof (1992) analisou o comprimento e a espessura de raízes usando scanners portáteis, além de um software por ele desenvolvido, utilizando o método da intersecção. O coeficiente de variação obtido foi de 1,7% em relação ao comprimento.

Tanaka, Yamauchi e Kono (1995) desenvolveram um método de medição de raízes através do software livre NIH Image. As bordas das raízes eram realçadas, os níveis de cinza da imagem eram ajustados para discriminar as raízes do fundo e, aplicado um fator de correção. O método obteve 99,9%, 99% e 92,5% de acerto para raízes de soja, milho e arroz, respectivamente.

Os softwares WinRHIZO™ (ARSENAULT *et al.*, 1995) e Delta-T Scan (KIRCHHOF e PENDAR, 1993), softwares disponíveis comercialmente com propriedade de calcular algumas características como o comprimento, diâmetro médio e área superficial das raízes, surgiram a partir desses sistemas automatizados. Esses softwares utilizam um escâner para a obtenção da imagem, colorida ou em escala de cinza, binarizada de acordo com um limiar definido pelo usuário.

Kaspar e Ewing (1997), utilizando-se de corante azul escuro, pintaram as raízes antes de submetê-las à medição pelo método desenvolvido, onde evitaram sobreposição e o limiar possuía um parâmetro fixo. Entre os comprimentos da abordagem proposta e os do método da linha de intersecção, a razão alcançada foi 0,88 e 0,98 para as medidas de comprimento.

Bauhus e Messier (1999) verificaram a acurácia do sistema WinRHIZO™, resultando a variante de 100% a 49%, dependendo do comprimento da linha por unidade de área e pelo limiar definido, além da sobreposição de raízes.

Kimura, Kikuchi e Yamasaki (1999) buscaram reduzir os erros ocasionados pela sobreposição, tamanho da amostra e orientação das raízes através da Equação (7), obtendo-se variações entre 0,81% e 0,16% no comprimento, onde N_d representa o número de pixels na diagonal, N_o o número de pixels na ortogonal, dpi a resolução da imagem dpi e C_{Kimura} o comprimento de raiz calculado.

$$C_{Kimura} = 0,948 \times (\sqrt{2N_d + N_o}) \times \frac{25,4}{dpi} \quad (7)$$

Kimura e Yamasaki (2001) compararam seu método ao de medição microscópica, e realizando o cálculo do diâmetro limitado a 2 pixels, o menor coeficiente de variação resultou em 7,8%.

Em 2013, Pierret *et al.* (2013) estimou o comprimento e o diâmetro médio radicular através de uma técnica computacional que utilizava um scanner de mesa e abordagens de processamento digital de imagens. Ao comparar o método proposto com o sistema comercial WinRHIZO™ obteve-se um coeficiente de determinação de 0,998.

Name (2013) utilizou de afinamento multiescala juntamente com um fator de correção para calcular o comprimento de raízes de soja. Comparado ao Método de Tennant, o coeficiente de variação resultou entre 0,1% e 2,1%.

Maruyama (2016) propôs um método com as seguintes etapas: carregar uma imagem; extrair o dpi; segmentar; testar se é uma raiz e, se sim, esqueletizar; identificar as ramificações; e calcular o comprimento e diâmetro médio; repetindo este teste condicional até percorrer a imagem inteira. A programação foi feita na Linguagem Java e foi comparada a acurácia com os métodos tradicionais e macro IJ_Rhizo. Alcançou-se um coeficiente de variação entre 0,05% a 9,27%, e 0,23% a 96,61% para as medidas de comprimento e para diâmetro, respectivamente.

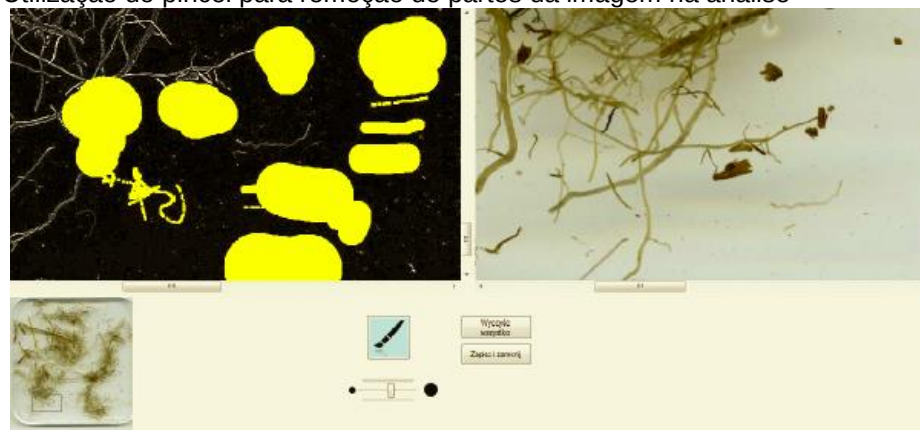
Com característica de software livre nacional, além do Name (2013) e Maruyama (2016), pode-se citar os sistemas SIARCS® – Sistema Integrado para Análise de Raízes e Cobertura do Solo (CRESTANA *et al.*, 1994) e o SAFIRA – Sistema de Análise de Fibras e Raízes (JORGE; RODRIGUES, 2008).

Em 2016, Nowakowski *et al.* elaboraram o software RootDetection, o qual realiza medidas de diâmetro e de comprimento e calcula a área superficial de raízes. O programa foi elaborado e testado com base em raízes de trigo, as quais foram cuidadosamente adquiridas e lavadas para separá-las de partículas de solo. No entanto, esses elementos adversos às raízes foram deixados propositalmente em algumas amostras, a fim de se propor uma solução, via software, para remoção dos mesmos. As raízes testadas no software foram escaneadas imersas em água, com cuidado para não haver distorção, utilizando o equipamento EPSON Protection V750Pro, com uma lâmpada na tampa, e configuração de aquisição de tamanho 3209x2513 pixels, resolução de 600 dpi, em tons de cinza, formato BMP, sem compressão, modo melhor qualidade.

Primeiramente, o usuário deve carregar a imagem no software RootDetection

e definir um limiar para que, com a imagem binarizada, seja possível utilizar a detecção de borda de raízes, e remoção de impurezas, semelhante aos softwares de edição de imagem onde se marcam os objetos indesejados para que sejam retirados. Para raízes de trigo, o melhor algoritmo para detecção de bordas, segundo os autores, foi o método de Laplace de máscara 3 x 3. Para se utilizar o módulo de remoção de impurezas, clica-se na respectiva opção no menu principal, sendo exibida uma nova janela com um pincel, o qual pode ser usado para pintar as áreas que serão desconsideradas durante a análise - Figura 12. Os pixels marcados em amarelo serão convertidos para preto, e desta forma o algoritmo não os identificará como objeto alvo nas medições. Para fazer a medição de comprimento, o algoritmo percorre todo o contorno do objeto identificado pela função de detecção de bordas contabilizando estes pixels brancos e, posteriormente, converte-os em centímetros (NOWAKOWSKI, 2016).

Figura 12 - Utilização do pincel para remoção de partes da imagem na análise



Fonte: Nowakowski *et al.* (2016)

Lobet G. *et al.* (2017) fizeram um estudo de aprendizado de máquina com base no modelo ArchiSimple para testar a calibração para medição de raízes através do *plugin* RIA-J, no software ImageJ. Para se criar a biblioteca de dados de sistema de radiculares diferentes, o modelo ArchiSimple foi rodado 10.000 vezes com um conjunto aleatório de parâmetros. As simulações foram divididas em dois grupos: o das raízes principais e o das raízes secundárias, sendo salvas em um arquivo RSML (*Root System Markup Language* – Linguagem de Marcação de Sistema de Raiz), que, em seguida eram lidas pelo *plugin* RSML Reader do programa ImageJ. Este *plugin* realizava a extração das características geométricas (largura, profundidade, coordenadas entre o centro e as raízes secundárias, razão entre largura e

profundidade) e morfológicas (área, diâmetro e comprimento) das raízes simuladas para se criar a biblioteca. Além disso, para cada arquivo de dados RSML, o RSML Reader criava três imagens em formato JPEG (resolução de 300dpi) para cada sistema radicular simulado, sendo nelas adicionado ruído tipo sal e pimenta (*salt and pepper*). Cada imagem gerada foi submetida ao *plugin* RIA-J, e os dados resultantes de comprimento, área e diâmetro foram analisados utilizando a linguagem R, gerando uma medida de erro relativo médio.

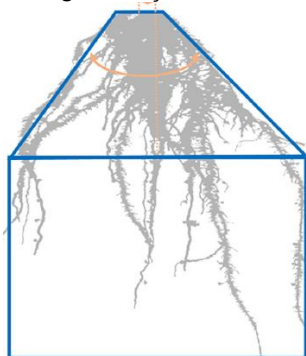
Mesmo para as imagens com ruído, o erro relativo médio alcançado foi abaixo de 0,1, dando destaque positivo ao trabalho. Os autores ressaltam que a automatização das medidas de raízes é uma tarefa difícil, onde a calibração, utilizando as amostras, pode auxiliar na acurácia e identificação das raízes; mas que depende fortemente do tipo, tamanho e complexidade do sistema radicular analisado, bem como da qualidade da imagem (Lobet G. *et al.*, 2017).

Flavel *et al.* (2017) desenvolveram o *plugin* Root1 para o ImageJ, o qual auxilia na segmentação e análise de raízes em 3D obtidas pela digitalização das raízes ainda no solo. A digitalização de raízes de trigo, grão de bico e cevada foram feitas com o equipamento GE-Phoenix V utilizando método de rotação constante. Inicialmente foi realizada a normalização do histograma destas imagens através do método de correspondência de pico, o qual identifica os picos no histograma e os alinha com um valor cinza semelhante pré-definido. Os valores foram convertidos de 32 para 16 bits visando otimização computacional e melhor contraste nos tons de cinza. Para se identificar as poros de ar no solo e outras impurezas, Flavel *et al.* (2017) mencionam que a combinação do filtro de detecção de borda “Sobel 2D” com a limiarização do *plugin* FIJI se obteve-se êxito, porém os limiares são determinados manualmente de forma apropriada para cada região escaneada, visto a dificuldade em diferenciar estruturas complexas do sistema radicular e o solo. Após essa separação, é utilizado um algoritmo de conectividade, e as raízes são estruturadas em 3D através do software VGStudioMax versão 2.0, visto limitação para esse fim utilizando o software ImageJ devido às restrições de memória. Para se medir os parâmetros de comprimento, densidade de comprimento, densidade de ramificação e número de ramificações com base na estrutura do esqueleto, foi utilizado o *plugin* ImageJ-FIJI com as opções “Esqueletizar (2D / 3D)” e “Analisar esqueleto (2D / 3D)” os quais geraram uma lista de todos os comprimentos de ramificação do sistema radicular analisado.

Flavel *et al.* (2017) realizaram a medição manual através do software WinRhizo para estimar as medidas das amostras a fim de compará-las com o método proposto. Para medidas de comprimento, obteve-se precisão de 1% de subestimação para raízes de trigo, 8% de subestimação para raízes de cevada e 10% de superestimação para raízes de grão de bico. O computador utilizado no estudo foi com processador Intel Xeon E5 de 3,5 GHz e 6 núcleos, 64 GB de RAM executando OSX 10.9.5. Para amostras de grão de bico, os tempos de escaneamento foram de cerca de 30 minutos com um tempo de processamento de cerca de 110 minutos. Para os sistemas mais extensos de trigo e cevada, os tempos de escaneamento foram de 50 minutos, com um tempo de processamento de pouco mais de 186 minutos. Os volumes de raiz de grão de bico obtiveram um coeficiente de determinação de 0,96 em relação às medidas do software WinRhizo.

Borianne *et al.* (2018) elaboraram a GT-RootS - *Global Traits of Root System*, ferramenta baseada em Java direcionada para medição de raízes de cereais como trigo e sorgo; que possui o modo automático e semiautomático. A ferramenta utiliza a técnica de limiarização e um algoritmo de indicação de similaridade para separar a planta do fundo da imagem sem intervenção do usuário - *triangle method*. Este método identifica a parte do sistema radicular mais denso em seu topo e o divide até chegar a uma altura; largura e deslocamento relativo diferente do que estava sendo computado; com um desenho remetido à ideia de uma casa, como os autores denominam de “*house-shaped*”, que pode ser observado na Figura 13. Assim, a segmentação é realizada separadamente com limiar apropriado para duas ou mais partes da imagem. A semiautomatização citada serve para que o usuário possa intervir caso a segmentação não seja realizada corretamente pela ferramenta.

Figura 13 – Divisão da imagem de raiz para segmentação utilizando *triangle method*



Fonte: Borianne *et al.* (2018)

As análises foram baseadas em raízes de arroz japonês retiradas do solo, lavadas e dispostas em um acrílico para aquisição das imagens através da câmera Nikon D810 com lente modelo Nikkor 50mm f/1.4 AF, configuração em escala de cinza, padrão de alta qualidade, tamanho 2650×6500 pixels, e extensão jpeg. Ao comparar as medições com o software D.I.R.T. (*Digital Imaging of Root Traits*) e Courtois, em conjunto com 64 imagens de raízes de arroz japonês, obteve-se uma similaridade significativa de 0,88% e desvio padrão de 0,06%. Através destes índices, os autores concluem que o GT-RootS satisfaz os requisitos de precisão e agilidade para análises, com duração de dois minutos para uma imagem em um computador com processador Xeon W3550 de 3 GHz (BORIANNE *et al.*, 2018).

Narissetti *et al.* (2019) propuseram a ferramenta semiautomática saRIA, implementada no MATLAB 2018 com base em aprendizado de máquina, que dispõe de uma limiarização adaptativa baseada no método Gaussiano e um filtro morfológico para eliminar os ruídos das imagens, onde o usuário pode intervir para fazer alterações necessárias. A ferramenta permite a análise de imagens de raízes em 2D com fundo limpo, ou no solo, no qual o estudo é focado. Inicialmente a imagem é carregada, e passa por um pré-processamento que pode envolver cortes na imagem apenas para a região de interesse, bem como suavização ou intensificação dos tons. Depois, na etapa de limiarização adaptável, as imagens são segmentadas entre raiz e fundo através da média ponderada Gaussiana. Passando para a filtragem morfológica, ruídos como areia, cascalho ou outras impurezas são removidos, visto que o algoritmo os diverge das raízes como estruturas que não possuem linhas ou curvas acentuadas e com comprimento razoável. Após, é feita a esqueletização, e caso necessário são feitas correções de ruídos também nesta etapa, através de filtros utilizados em imagens binárias. Através deste esqueleto são feitas as análises, calculando-se os indicadores do sistema radicular, com as medidas informadas em milímetros. Um coeficiente de similaridade de dados (DSC – *Dice Similarity Coefficient*) é usado para examinar o desempenho da segmentação automática criada, comparando-a com resultados de medidas de segmentação manual nesta ferramenta.

O saRIA fornece indicadores como o comprimento total, diâmetro e volume, além de outros parâmetros com relação à ramificação e angulação, e demonstrou um tempo médio de cinco segundos para processamento e análise de uma imagem de raiz de *Arabidopsis* em um computador com processador Intel Core i5-4570S de

2.9 GHz e 4GB de RAM (NARISSETTI *et al.*, 2019). O DSC para análise de 100 imagens de raízes desta planta no solo resultou em sua média 0,82. Os autores apontam que a ferramenta saRIA obtém melhores resultados para análise de raízes no solo do que nos sistemas IJ_Rhizo e GiAroots, pois a limiarização global aplicada nestes softwares possuem um desempenho inferior a métodos adaptativos utilizados. Ainda, mencionam que o software GiAroots, mesmo aplicando um método adaptativo, possui algumas limitações com relação à características morfológicas. Narisetti *et al.* (2019) também cita que a ferramenta pode ser utilizada como alternativa gratuita ao WinRhizo. Mesmo com bom resultado médio de DSC, cinco das 100 amostras obtiveram este coeficiente abaixo de 0,5. No trabalho é justificado que essas amostras são de raízes em estágio inicial, e a diferença na estrutura evidencia a individualidade em cada amostra de raiz a ser analisada, sendo a generalização para solução do problema uma meta ainda a ser atingida. A ferramenta SaRIA em seu modo semi-automático foi comparada com medidas manuais no software SmartRoot para 126 amostras de *Arabidopsis*, e demonstrou coeficiente de determinação de 0,8496 para comprimento, 0,8612 para área superficial, e 0,7768 para volume (NARISSETTI *et al.*, 2019).

Wang *et al.* (2019) preferem métodos não destrutivos de análise para não ocasionar escavação do solo na extração das raízes. No entanto, os autores citam a dificuldade da tarefa de segmentação das imagens das raízes devido ao seu contraste com as partículas do solo. Devido a isso, foi desenvolvido um método de segmentação chamado SegRoot, utilizando Python, totalmente automatizado e baseado em redes neurais convolucionais (CNN - *Convolutional Neural Network*), as quais aprendem características morfológicas em diferentes níveis de abstração. Para funções de processamento de imagem como transformação de cor, corte, rotação e inversão, foram utilizadas as bibliotecas OpenCV e NumPy. A ferramenta é focada na medição de comprimento do sistema radicular. O computador utilizado para os experimentos foi um MacBook Pro 2016 com Intel Core i7-6920HQ, 16 GB de RAM, e placa de vídeo GPU of Nvidia GTX 1080 Ti. No estudo, os pesquisadores adquiriram imagens de 478 amostras de raízes de soja, em 8 fases, dentro de um intervalo de dois meses, totalizando 3824 imagens. No entanto, para desenvolvimento do projeto SegRoot, foram escolhidas apenas 300, aleatoriamente. Dessas, 65 foram medidas manualmente no software WinRhizoTRON para fim de comparar os resultados, bem como utilizadas para treino da CNN desenvolvida; e as

235 restantes foram utilizadas para serem analisadas pela ferramenta automatizada. O SegRoot obteve um coeficiente de correlação 0,9791 ao ser comparado com os comprimentos medidos manualmente no WinRhizoTRON. Os autores encontraram uma limitação no método proposto com relação às raízes mais finas, menores que um pixel, as quais não são completamente identificadas na etapa de segmentação (WANG *et al.*, 2019).

Urrestarazu *et al.* (2020) realizaram a comparação de um método não invasivo utilizando a análise termográfica em imagens de raízes no MATLAB, com método tradicional de análise no software ImageJ. Concluiu-se que a análise no MATLAB é útil na detecção de raízes menores do que um milímetro, o que não é possível nos outros métodos. Além disso, a análise termográfica no MATLAB produziu menores erros no cálculo do volume que o software ImageJ, 1,88 % e 2,85 %, respectivamente, mostrando que o método pode ser de grande serventia no controle da evolução e monitoramento do estado fisiológico da planta, que são essenciais no desenvolvimento e produtividade.

De acordo com González *et al.* (2020), as ferramentas de mensuração de raízes disponíveis para a comunidade são limitadas em relação às características das imagens utilizadas e sua usabilidade, fatores estes que podem influenciar diretamente nos resultados. O software MyROOT foi proposto para medir raízes primárias, com base em métodos de análise dos canais de cores do histograma para classificação do objeto alvo (Histogramas de Gradientes Orientados, Dalal *et al.*, 2005), bem como *linSVM* como o classificador. Ao ser comparado com os softwares BRAT e EZ-Rhizo obteve um maior nível de precisão na detecção automática de raízes primárias da herbácea de *Arabidopsis* (98% de precisão contra 69,6% e 89,3%, respectivamente).

Vários experimentos são realizados comparando a eficiência de métodos previamente desenvolvidos e de ferramentas disponíveis no mercado. Quanto às pesquisas nesse contexto, utilizando software livre, podem-se citar Maruyama (2016), Name (2013), Pierret (2013), Jorge e Rodrigues (2008) e, Crestana *et al.* (1994).

Um resumo dos artigos citados encontra-se no Quadro 1 ao final desta seção. Os avanços na análise de comprimento e espessura de sistemas radiculares, normalmente, ocorrem a partir de técnicas já utilizadas, incorporando métodos de processamento de imagens na tentativa de aumentar a precisão dos métodos já

existentes, ou facilitar a obtenção de dados. Conforme a leitura dos artigos citados, pode-se perceber que o software WinRhizo ainda é referência para avaliação dos métodos criados, e, além disso, automatizar e generalizar a medição de raízes ainda é um impasse computacional.

Mesmo sendo demorada, exaustiva, complexa e, em inúmeros casos não fornecer a acurácia necessária, a avaliação do sistema radicular de plantas por meio dos métodos tradicionais ainda é bastante utilizada (SMIT *et al.*, 2000).

Quadro 1 – Métodos computacionais para a determinação de parâmetros radiculares.

(continua)

Software	Referência	Aquisição	Imagem	Cor	Segmentação	Medição	Material de Validação	Métrica
NE	Lebowitz (1988)	Câmera de Vídeo Panasonic WV-1400, Conversor AD Microworks DS-88	256 x 256 px	Cinza	Limiarização	C e DM	Raízes de <i>Coleus scutellarioides</i> e fios de cobre	EPM
NE	Zoon e Tienderen (1990)	Câmera Bosch T YK 9C	256 x 256 px	Cinza	Limiarização	C	Raízes e fios	CV
GUNSCAN	Kirchhof (1992)	Escâner DFI Handy HS-3000	200 dpi, 400 dpi	Cinza	NE	C e DM	Linhas desenhadas	CV
NIH Image v. 1.44*	Tanaka, Yamauchi e Kono (1995)	Escâner Epson GT-6000	250 dpi	Cinza	NE	C	Raízes de milho, soja e arroz	CC
RHIZO	Arsenault <i>et al.</i> (1995); Bauhus e Messier (1999)	Escâner, Escâner Hewlett-Packard ScanJet 3c/T TX	300 dpi, 600 dpi	Cinza	Limiarização	C, PA, AS e CPD	Raízes de <i>Picea glauca</i> e arbusto caducifólio, fios, linhas e cilindro de grafite	DP
Rootedge	Kaspar e Ewing (1997)	Escâner Hewlett-Packard ScanJet 9190A	300 dpi, 600 dpi, TIFF	Cinza	Limiarização	C, A e P	Raízes de milho	R e DP
NIH Image v. 1.60*	Kimura, Kikuchi e Yamasaki (1999)	Escâner HP ScanJet 4c	150 dpi, 300 dpi, TIFF	Cinza	Limiarização	C	Raízes de arroz e fios de cobre	CV
NIH Image v. 1.61*	Kimura e Yamasaki (2001)	Escâner HP ScanJet 4c	300 dpi, 600 dpi, TIFF	Cinza	Limiarização	C e DM	Raízes de arroz e fios de cobre	CV
ImageJ* e IJ Rhizo	Pierret <i>et al.</i> (2013)	Escâner Epson Expression 10000XL	400 dpi, TIFF e JPEG	Cinza	Automática e Limiarização	C e DM	Raízes de uva e linhas desenhadas	CD e EM
RoMe	Name (2013)	Escâner Lexmark X4690 e Escâner Epson Stylus TX115	300 dpi, JPEG, 2000 x 3050 px e 733 x 700 px	Cinza	Limiarização	C e DM	Raízes de soja e fios de cobre	CV
TMM	Maruyama (2016)	Escâner Epson Perfection V700 Photo	300 dpi, BMP	Cinza	Limiarização	C e DM	Raízes de milho e fios de náilon	ERP e CV
RootDetect ion	Nowakowski <i>et al.</i> (2016)	Escâner Epson Protection V750Pro.	3209x2513, 600 dpi, BMP	Cinza	Limiarização	C, DM, AS	Raízes de trigo	NE

Quadro1 – Métodos Computacionais para a Determinação de Parâmetros Radiculares.

(conclusão)

Software	Referência	Aquisição	Imagem	Cor	Segmentação	Medição	Material de Validação	Métrica
RIA-J	Lobet G. <i>et al.</i> (2017)	NE	300 dpi	Cinza	Automático	C, DM, AS	Linhas geradas randomicamente	EM
Root1	Flavel <i>et al.</i> (2017)	GE-Phoenix V	600 dpi	Cinza	Semi Automático e limiarização	C, DC, DR	Raízes de trigo, cevada e grão de bico	CD
GT-RootS	Borianne <i>et al.</i> (2018)	Câmera Nikon D810 com lente Nikkor 50mm f/1.4 AF	2650×6500, 15 MP, JPEG	Cinza	Automático e limiarização	C, DM, DC, DR, AS	Arroz Japonês	DP
saRIA	Narisetti <i>et al.</i> (2019)	Epson Expression 10 000 XL scanner (Seiko Epson)	300 dpi	Cinza	Semi Automático e limiarização	C, DC, DM, AS, DR, OA	<i>Arabidopsis</i>	DSC
SegRoot	Wang <i>et al.</i> (2019)	Minirhizotron câmera (CI600, CID Bioscience, Camas, WA, USA)	2273×2550 pixels	Cinza	Automático	C	Soja	CC
MyROOT	González <i>et al.</i> (2020)	Câmera D7000 Nikon	4928×3264 pixels	Cinza	Automático	C	<i>Arabidopsis</i>	EM

NE: Não especificado. Medição - A: área; AS: área superficial; C: comprimento; CPD: comprimento por classe de diâmetro; CR: crescimento radicular; DC: densidade de comprimento; DR: densidade de ramificação; DM: diâmetro médio; DSC: coeficiente de similaridade de dados; P: perímetro; PA: projeção de área. Métrica - CC: coeficiente de correlação; CD: coeficiente de determinação; CV: coeficiente de variação; DP: desvio padrão; EM: erro médio; EPM: erro padrão da média; ERP: erro relativo percentual; R: razão entre o valor obtido e o valor real.; AO: orientação angular das raízes; * Software de terceiros.

Fonte: O autor

3.2 SISTEMAS WINHRHIZO, ROME E TMM

Esta seção apresenta os sistemas que serão avaliados neste trabalho: WinRhizo, RoMe e TMM, sendo o primeiro um software comercial e os dois últimos resultados de dissertações concluídas na Universidade Estadual de Ponta Grossa.

3.2.1 WinRhizo

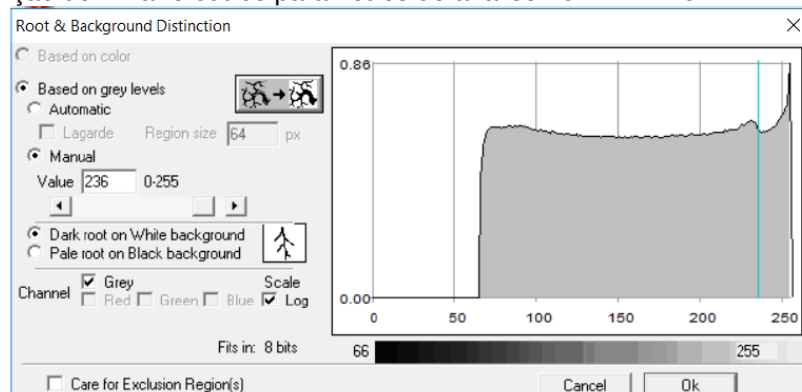
O sistema WinRhizo possui o custo em torno de R\$ 15.000,00 (WINRHIZO, 2019) para a utilização na obtenção de informação de imagens de raízes (versão regular), a comprovação de sua aquisição é feita mediante uso de uma chave física, conectada a uma porta serial universal (*Universal Serial Bus – USB*) do computador em que foi instalado o sistema.

É possível realizar a captura de imagens através de um escâner que é adquirido juntamente com o software. O sistema também permite carregar arquivos para as análises nos formatos TIFF (.tif), Windows bmp (.bmp) ou JPEG (.jpg) (WINRHIZO, 2019).

Para a análise das imagens, o sistema WINRHIZO permite a utilização de um limiar automático ou manual (Figura 14), bem como definir se a imagem é de uma raiz preta em fundo branco ou o inverso, e qual a cor dos canais em que será feita a análise: cinza, vermelho, verde, azul (WINRHIZO, 2019).

Para acessar esta tela, basta conectar a chave via porta USB, abrir o WinRhizo e a imagem que se deseja medir, e clicar nas opções “*Analysis*”, “*Root & Background Distinction*”.

Figura 14 - Definição do limiar e outros parâmetros de análise no WinRhizo

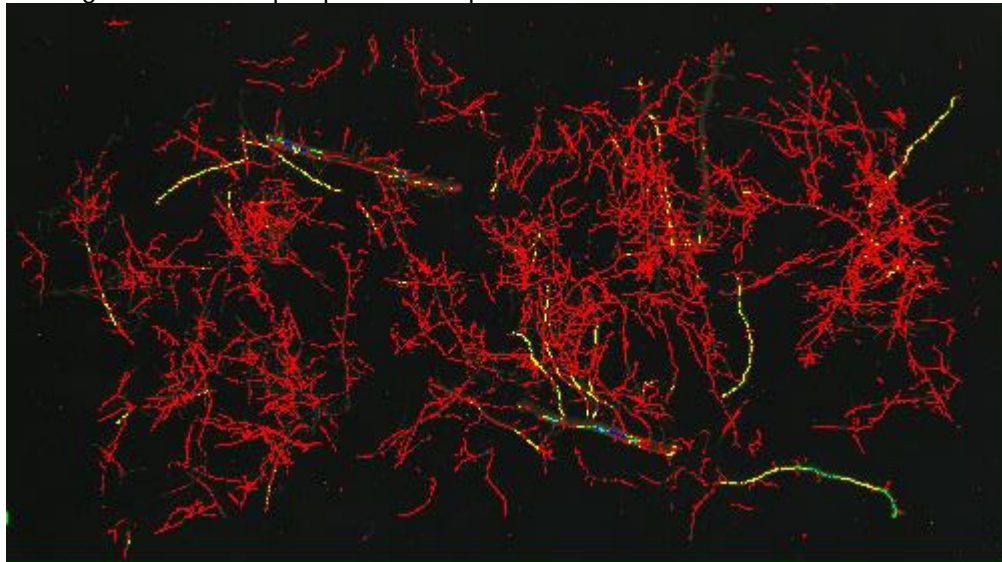


Fonte: O autor (2020)

Após a análise da imagem, o WinRhizo mostra a imagem da raiz colorida pela cor vermelha indicando a parte foi classificada para obtenção do comprimento (Figura 15).

O sistema WinRhizo permite ainda que as imagens sejam exportadas nos formatos .TIF e .BMP e permite a geração de um arquivo .TXT contendo as informações de equipamento, configurações, nome da amostra, operador da máquina e valores obtidos a partir da análise como comprimento total, área superficial total, diâmetro total, volume total, número de interseções, área analisada, limiar utilizado, diâmetro médio, comprimento por volume e número de ramificações.

Figura 15 - Imagem de raízes após processada pelo WinRhizo



Fonte: O autor, (2020)

O software acompanha um scanner da marca Epson, modelo Perfection V800 Photo, e um arquivo de calibração do scanner, ambos para permitir ao usuário realizar a aquisição da imagem e medição imediata das raízes.

3.2.2 RoMe

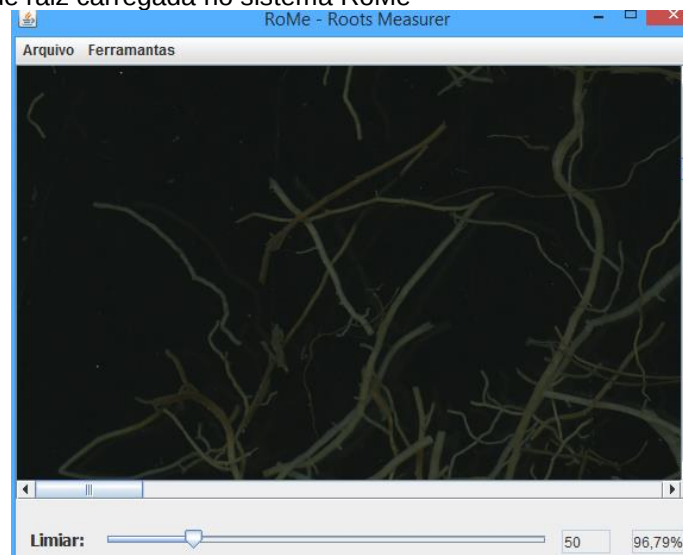
O sistema RoMe pode ser baixado e utilizado sem custo, por se tratar de um software livre. Os requisitos mínimos são: computador com processador Intel® Core™ i3, plataforma Windows 7 (32 ou 64 bits), 4GB de memória RAM, 2 GB de espaço livre em disco rígido, Java ou JRE 1.7.0 ou posterior, e a biblioteca OpenCV que deve ser instalada no diretório raiz C:\.

Para análise dos parâmetros radiculares é realizada a soma da distância euclidiana entre os pixels após o processo de esqueletização, dependendo do valor do limiar definido pelo usuário. O software obtém o eixo médio radial e consegue fornecer parâmetros radiculares como comprimento, diâmetro e área superficial.

Não é possível adquirir imagens através deste sistema, apenas carregar imagens nos formatos PNG, Windows BMP ou JPEG.

O limiar é variado conforme barra deslizante inferior, Figura 16. Logo acima está parte da imagem carregada, a qual pode ser visualizada completamente com o aumento da janela do sistema.

Figura 16 - Imagem de raiz carregada no sistema RoMe



Fonte: O autor

Posteriormente à análise, é disponibilizada a opção de exportar a tabela, que contém dados como: comprimento total, diâmetro total e volume total da amostra, em um arquivo de formato .xls, para ser aberto em planilha eletrônica.

3.2.3 TMM

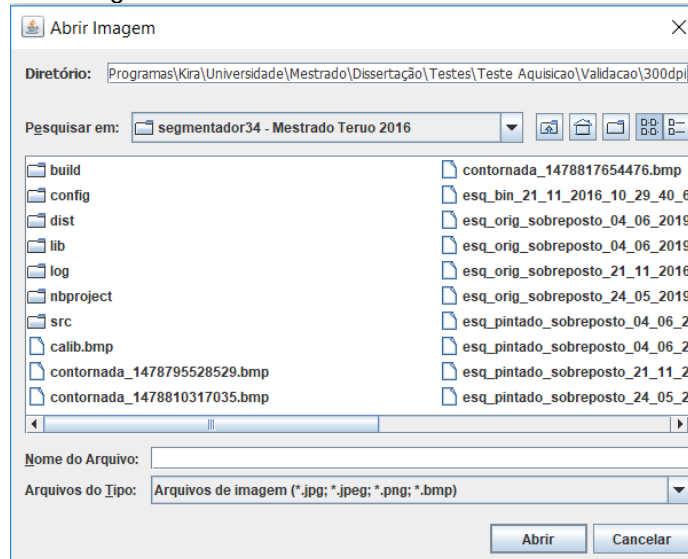
Criado por Maruyama (2016), TMM é um software livre que, ao ser iniciado, carrega a imagem selecionada na memória, a converte em modo monocromático, e aplica-se a limiarização definida pelo usuário. O resultado é uma imagem binária, onde o fundo e o objeto estão separados.

Com as raízes separadas do fundo, aplica-se o método de detecção de

contornos, e, logo após, são esqueletizadas com o algoritmo de afinamento multi-escala (PLOTZE e BRUNO, 2004).

O sistema TMM permite que sejam analisadas imagens que estejam nos formatos PNG (.png), Windows bmp (.bmp) ou JPEG (.jpg), como demonstrado na Figura 17.

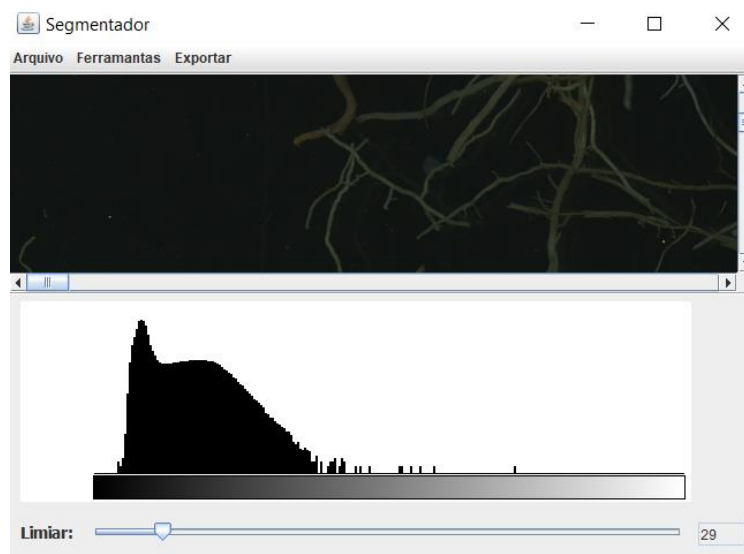
Figura 17 - Importação de imagem no sistema TMM



Fonte: O autor

Similar ao sistema RoMe, o sistema TMM oferece a possibilidade de alteração do limiar, apenas de forma manual, através da barra deslizante inferior (Figura 18).

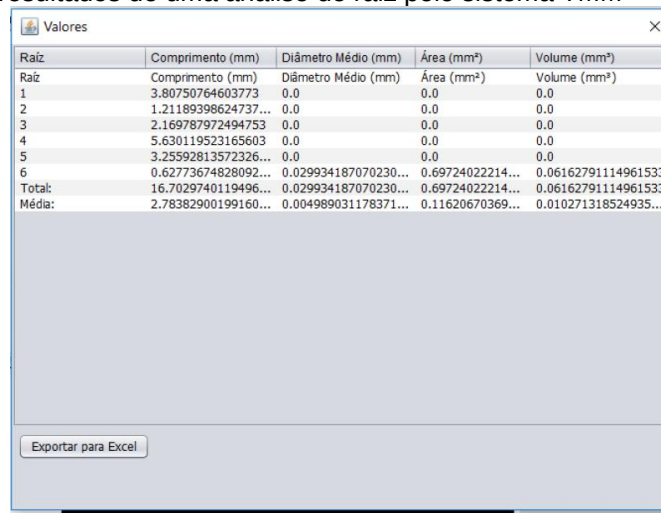
Figura 18 - Definição de limiar através da barra inferior, e histograma da imagem da raiz no sistema TMM.



Fonte: O autor

Com o software TMM também é possível exportar a análise em uma tabela de resultados para um arquivo .xls que pode ser aberto em planilha eletrônica. Nessa tabela estão os dados referentes ao comprimento total, diâmetro total e volume total da amostra (Figura 19).

Figura 19 - Tabela de resultados de uma análise de raiz pelo sistema TMM



Raiz	Comprimento (mm)	Diâmetro Médio (mm)	Área (mm²)	Volume (mm³)
1	3.80750764603773	0.0	0.0	0.0
2	1.21189398624737...	0.0	0.0	0.0
3	2.169787972494753	0.0	0.0	0.0
4	5.630119523165603	0.0	0.0	0.0
5	3.25592813572326...	0.0	0.0	0.0
6	0.62773674828092...	0.029934187070230...	0.69724022214...	0.06162791114961533
Total:	16.7029740119496...	0.029934187070230...	0.69724022214...	0.06162791114961533
Média:	2.78382900199160...	0.004989031178371...	0.11620670369...	0.010271318524935...

Fonte: O autor

O sistema TMM apresenta um menu de ferramentas, entre as quais está a opção “Pintar objetos e mostrar informações”, que permite que as raízes sejam pintadas, assim como no sistema WinRhizo.

4 METODOLOGIA

Neste Capítulo são descritos os materiais utilizados, a sistemática das medidas e da análise dos resultados.

4.1 MATERIAIS

Os materiais de base para a realização deste trabalho são amostras de imagens de fios de náilon e imagens de raízes lavadas de milho. A forma de aquisição dessas imagens, realizadas por Maruyama (2016), é descrita nas seções 4.1.1 e 4.1.2.

4.1.1 Imagens de fios de náilon

Foram utilizados fios de náilon em trabalhos correlatos (ROWSE; PHILIPS, 1974; MARUYAMA, 2016) pela possibilidade de simulação de comprimentos e diâmetros diferentes, similaridade de suas imagens com imagens de raízes, e conhecimento das medidas de comprimento e diâmetro.

A totalidade das amostras constituem-se de cinquenta diferentes tamanhos de fios de náilon, as mesmas que serviram de base para o trabalho de Maruyama (2016), e se encontram armazenadas em um HD externo no Laboratório CCA - 8 do Departamento de Informática da Universidade Estadual de Ponta Grossa - UEPG, Bloco L.

Dessas cinquenta amostras, trinta são compostas por fios de 0,35 mm de diâmetro, de um a trinta metros de comprimento, variando de um em um metro. As vinte amostras restantes, são compostas conforme segue:

- a) Quatro amostras compostas por fios de náilon de 0,25mm de diâmetro, com um a quatro metros de comprimento, variando de um em um metro;
- b) Quatro amostras compostas por fios de náilon de 0,30mm de diâmetro, com um a quatro metros de comprimento, variando de um em um metro;
- c) Uma amostra composta por fios de náilon de 0,90 mm de diâmetro com comprimento total de um metro;
- d) Seis amostras compostas por um metro de fio de náilon de cada um dos dois

diâmetros nominais diferentes:

- 0,25 mm e 0,30 mm;
- 0,25 mm e 0,35 mm;
- 0,25 mm e 0,90 mm;
- 0,30 mm e 0,35 mm;
- 0,30 mm e 0,90 mm;
- 0,35 mm e 0,90 mm

e) Quatro amostras compostas por um metro de fio de náilon de cada um dos três diâmetros nominais diferentes:

- 0,25 mm; 0,30 mm e 0,35 mm;
- 0,25 mm; 0,30 mm e 0,90 mm;
- 0,25 mm; 0,35 mm e 0,90 mm;
- 0,30 mm; 0,35 mm e 0,90 mm

f) Uma amostra composta por um metro de fio de náilon de cada um dos quatro diâmetros (0,25 mm; 0,30 mm; 0,35 mm e 0,90 mm).

Maruyama (2016) realizou a aquisição das imagens dos fios de náilon através do scanner Epson Perfection V700 Photo/V850, em formato .BMP com resolução de 300 dpi, tampa do escâner aberta, e com o vidro limpo com álcool etílico 70%. Os segmentos dos fios de cada amostra foram dispostos sobre o vidro do escâner de forma que não houvesse sobreposição, e que não encostassem nas bordas do vidro do escâner. É importante que a resolução seja escolhida de modo condizente com as medidas a serem aferidas.

As amostras de números 5 a 30 são compostas por mais de uma imagem, visto que, para suas aquisições, Maruyama (2016) necessitou, por falta de espaço e melhor organização no compartimento do escâner, até que completasse todas as amostras, dispô-las mais de uma vez. Dessa forma, são 78 imagens de fios de náilon compondo as 50 amostras.

A Figura 20 representa a imagem obtida da amostra nº 2, que totaliza 2 metros de fio com 0,35 mm cortados com uma tesoura comum, sem ponta.

A partir das imagens de Maruyama (2016), as mesmas foram submetidas aos sistemas. A acurácia dos sistemas WinRhizo, RoMe e TMM foi avaliada com estas amostras justamente por se ter comprimento e diâmetro conhecidos, como colocado anteriormente. Maiores detalhes dos procedimentos para aquisição de imagens de

Maruyama (2016) estão no Anexo A.

Figura 20 – Imagem da amostra nº 2 de fios de náilon



Fonte: Maruyama (2016)

4.1.2 Imagens de raízes

As imagens de raízes de milhos utilizadas neste trabalho são de Maruyama (2016), e foram adquiridas com escâner Epson Perfection V700 Photo com a tampa aberta, em modo colorido, profissional, formato BMP e resolução de 300 dpi. As raízes de milho utilizadas como base para as imagens são provenientes da Fazenda São José, município de Palmeira, Estado do Paraná, Brasil, coletadas no ano de 2015. Os detalhes da aquisição das imagens podem ser encontrados no Anexo 1.

Para este trabalho foram utilizadas 30 amostras das imagens que estão também armazenadas em um HD externo presente no Laboratório CCA - 8 do Departamento de Informática da UEPG.

As amostras, em sua totalidade, são de raízes de milho coletadas na camada de profundidade de 10 a 20 cm, na linha. A Figura 21 representa a imagem de uma das amostras.

Figura 21 – Imagem de amostra de raiz de milho lavada.



Fonte: O autor

O referido autor realizou as medidas do comprimento e diâmetro médio das raízes dessas imagens com base no método tradicional de Tennant (1975), sendo estas as medidas serão utilizadas para aferir a acurácia dos sistemas WinRhizo, RoMe e TMM.

É importante ressaltar que, apesar do método de Tennant (1975) não fornecer a acurácia necessária para a medição do comprimento radicular, diversas pesquisas utilizaram-no como critério de validação para a avaliação desse parâmetro (MURAKAMI e YONEYAMA, 1988; LEBOWITZ, 1988; KASPAR e EWING, 1997; BAUHUS e MESSIER, 1999; KIMURA, KIKUCHI e YAMASAKI, 1999; KIMURA e YAMASAKI, 2001; NAME, 2013).

4.1.3 Hardware e software para execução dos sistemas

Para a execução dos sistemas WinRhizo, RoMe, e TMM, descritos na seção 3.2 deste trabalho, foi utilizado um computador também disponível no Laboratório CCA - 8 do Departamento de Informática da UEPG, com a seguinte configuração: Windows 10 64bits, 16GB memória RAM, 1TB de armazenamento interno e processador Intel Core i7-6700HQ.

Para que os sistemas TMM e RoMe fossem executados e o acesso ao código

fosse possibilitado, foi utilizado a biblioteca OpenCV versão 3.3.0, Java versão 8 e software NetBeans na versão 11.0.

4.2 MÉTODO

Nesta seção estão descritos os procedimentos dos testes a serem realizados com as imagens de fios de náilon, e posteriormente com as imagens de raízes, bem como é explanado o parâmetro de limiar a ser avaliado nos sistemas que estão sendo comparados.

4.2 LIMIAÇÃO NOS SISTEMAS WINRHIZO, ROME E TMM

Após o carregamento ou captura da imagem para análise no sistema, é possível avaliar os parâmetros utilizados para a análise, que afetam os atributos obtidos das raízes.

Para a análise das imagens, o sistema WinRizho permite a utilização de um limiar automático ou manual, se a imagem é de uma raiz preta em fundo branco ou o inverso, raiz branca em um fundo preto e qual a cor dos canais que será feita a análise: cinza, vermelho, verde ou azul.

Os dados obtidos no WinRizho foram selecionados e tratados, pois o arquivo texto de exportação fornecido por este sistema continha informações que eram irrelevantes no âmbito deste trabalho. Além disso, o fato de existir amostras com duas ou três imagens causou a necessidade de somar os comprimentos resultantes das mesmas.

Quanto aos sistemas RoMe e TMM, o único parâmetro que pode ser controlado para análise é o valor do limiar utilizado, ou seja, eles apresentam somente o limiar manual.

Portanto, foi utilizado, por padrão de análise, o limiar manual nos três sistemas.

4.2.1 Determinação do limiar adequado com base em imagens de fios de náilon

Inicialmente, o parâmetro do limiar foi testado a cada onze unidades, para

todas as imagens de fios de náilon, em cada sistema. O critério do intervalo foi baseado em trabalhos correlatos citados neste projeto (MARUYAMA, 2016; NAME, 2013).

Os valores dos limiares colocados nos sistemas para cada uma das cinquenta amostras de fios de náilon foram: 1, 12, 23,34, 45, 56, 67, 78, 89, 100, 111, 122, 133, 144, 155, 166, 177, 188, 199, 210, 221, 232, 243,254. Os valores de 0 e 255 foram retirados do intervalo pois representam a imagem completamente preta ou completamente branca, respectivamente.

Conforme descrito na seção 4.1.1, há amostras que geraram mais de uma imagem. Dessa forma, foram 78 imagens de fios de náilon a serem submetidas a cada limiar citado anteriormente, totalizando, nesta primeira fase, 1872 medições em cada sistema.

O Quadro 2 apresenta um exemplo de quadro de análise dos limiares para um determinado sistema. Esse quadro possui o número da amostra (Nº), o comprimento (C) conhecido e a medida obtida para cada limiar de um determinado sistema.

Quadro 2 - Exemplo de quadro de análise dos limiares para um determinado sistema.

Amostra		1		12		23		...	
Nº	C(mm)	C(mm)	ERP C%	C(mm)	ERP C%	C(mm)	ERP C%	...	...
1									
2									
...									
		$\overline{\text{ERP}}$		$\overline{\text{ERP}}$		$\overline{\text{ERP}}$		$\overline{\text{ERP}}$	

Fonte: O autor

O valor ERP C% é o módulo do erro relativo percentual para comprimento de cada amostra, e O valor $\overline{\text{ERP}}$ representa a média dos ERPs C% para determinado limiar. O valor do erro percentual relativo é calculado através da Equação 8, e o valor do erro percentual relativo absoluto é obtido, realizando o módulo do valor do erro percentual relativo, Equação 9, pois o valor estimado pode ser menor que o medido. Esse valor foi usado para efetuar uma comparação quantitativa entre os sistemas.

$$\text{ERPa} = ((\text{valor estimado} - \text{valor medido}) * 100) / \text{valor medido} \quad (8)$$

$$ERP = ((|\text{valor estimado} - \text{valor medido}|) * 100) / \text{valor medido} \quad (9)$$

Após os resultados tabelados, foram elencados os menores valores da média dos erros percentuais absolutos para definir uma referência de limiar a ser variada no intervalo de cinco unidades para mais e para menos, com passo de uma unidade, a fim de refinar os resultados. O procedimento ocorreu para as medições de comprimento (C) de cada sistema.

Entretanto, se após a análise dos resultados for verificado que há uma diferença maior que 5% entre todos os erros percentuais médios absolutos, de limiares consecutivos, inicialmente medidos de 11 a 11 unidades, a busca pelo limiar adequado ocorreu escolhendo-se novos valores de limiar para avaliação do erro.

Esses valores, então, foram evoluídos de dois em dois, a partir de um intervalo definido pelos valores intermediários de limiar, para mais ou para menos, dos dois valores de limiar que apresentaram menor erro percentual médio absoluto.

Por exemplo, para valores de limiar, com menores erros, de 23 e 34; com o menor valor do erro para o limiar 23, determina-se o valor intermediário entre 12 e 23, que é 19; e o valor intermediário entre 23 e 34, que é 29. Então, no intervalo entre 19 e 29, as medidas foram feitas para variação do valor de limiar de 2 em 2.

Esse resultado foi comparado com o restante dos limiares, de onde foi aferida a tendência para o menor erro percentual médio.

Após esse procedimento foi escolhido o limiar a ser variado com passo de uma unidade, como explicado anteriormente. Justifica-se esse intervalo pelo fato de trabalhos correlatos demonstrarem um coeficiente de variação relativamente alto à mínima variação de limiar (Seção 3.1).

Em seguida, as imagens foram novamente submetidas para análise, refazendo o procedimento descrito e escolhendo finalmente um valor de limiar adequado de cada sistema para as medidas de comprimento. A escolha deste valor foi com base também nos menores índices de porcentagem de erro resultantes.

Após o encontro dos limiares adequados para cada sistema, foram realizadas comparações, analisando a proximidade, entre os resultados apresentados (valores estimados), e as medidas reais (valor medido), o que permitiu a definição da acurácia e da sensibilidade ao valor de limiar de cada um deles.

Para isso, foi tabelada, para cada sistema, a média aritmética do

ERP de comprimento e para os valores de limiar adequados encontrados, e então foram avaliadas as acurácias. Para a análise da sensibilidade, foram feitos gráficos de erros percentuais médios absolutos para limiares próximos ao adequado para identificar quão crítico é a escolha do valor de limiar.

Posteriormente, foi calculado e analisado o desvio padrão (DP), para os erros percentuais médios, e o coeficiente de determinação (R^2) entre os valores estimados e os valores medidos para os limiares da primeira e segunda fase nos três sistemas.

O desvio padrão (DP), calculado através da Equação 10, mede o grau de dispersão entre os dados (CORREA, 2003). Nesta equação, n representa o número total de amostras, $\bar{x}$ a média dos resultados de erro, e x_i o erro da amostra i .

$$DP = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n}} \quad (10)$$

O coeficiente de determinação (R^2) calculado pela Equação 11, mede a proporção da variabilidade entre os dados através da soma de quadrados da regressão (SQR) e a soma de quadrados totais (SQT) e varia entre 0 e 1 (CORREA, 2003).

$$R^2 = \frac{SQR}{SQT} \quad (11)$$

4.2.2 Variação do limiar para amostras de imagens de raízes de milho lavadas

Após encontrar um limiar adequado de cada sistema para as medidas de comprimento de fios de náilon, com passos descritos na seção anterior, as imagens de raízes de milho foram submetidas, inicialmente, a testes com este valor.

Caso os erros percentuais fossem acima dos encontrados para as imagens de fios de náilon, seria refeito o processo descrito na seção 4.2.1 para as imagens de raízes de milho: variação a cada 11 unidades de 0 a 255, elencando-se o melhor limiar desta faixa.

Depois, esse valor seria variado em cinco pontos, com passo de uma unidade, para mais e para menos, por justificativas já descritas na Seção 4.2.

A análise dos sistemas foi por meio da comparação das estimativas de

comprimento medidos por Maruyama (2016) através dos métodos tradicionais (Tennant,1975; SCHENK e BARBER, 1979), e os resultados obtidos com os limiares, adequados e próximos a este, aplicados em cada sistema, para as imagens de raízes de milho lavadas. Os dados foram dispostos em um quadro, similar ao Quadro 2.

O desvio padrão (DP) e coeficiente de determinação (R^2) também foram calculados para os resultados das medidas de raízes para outra forma de análise estatística dos dados.

5 RESULTADOS

Com base no referencial teórico levantado para esta pesquisa, observou-se que, até o presente momento, as ferramentas automatizadas para auxiliar na medição de raízes ainda possuem limitação na identificação e separação do objeto alvo. Para se identificar as raízes e distingui-las do fundo da imagem, há necessidade do usuário configurar o parâmetro de limiar para que os sistemas atuem de modo satisfatório, adequando-se à imagem que está sendo submetida para análise, e trazendo resultados com acurácia acima dos 80%.

Este Capítulo apresenta os resultados de medições de fios de náilon e de raízes de milho, ambas nos sistemas WinRhizo, RoMe e TMM, e tem por intuito demonstrar, através do erro percentual médio absoluto, $\overline{ERP}$ s, a sensibilidade dos softwares na variação do parâmetro de limiar para as amostras utilizadas.

Limiares que resultaram em $\overline{ERP}$ s acima de 90%, os anteriores ou posteriores, com resultados acima deste valor de modo crescente, foram descartados dos Apêndices citados neste capítulo.

As amostras 31 a 34 de fios de náilon foram tratadas em seção própria, por apresentar erro percentual acima de 100% nos limiares que tiveram melhor desempenho no restante amostral, comprometendo sua média. Os Apêndices A a C, com as medidas das imagens de fios de náilon, contêm os resultados de todas as amostras, e o cálculo do $\overline{ERP}$ é realizado para os dois casos: considerando e desconsiderando essas amostras. Os Apêndices D a F, com as medidas das imagens de raízes lavadas, contêm os resultados de todas as amostras, e o cálculo do $\overline{ERP}$.

5.1 FIOS DE NÁILON

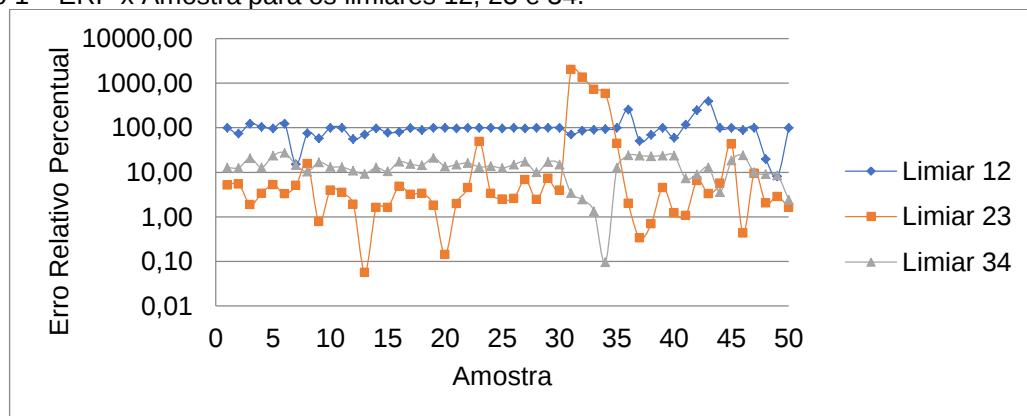
Conforme descrito na seção 4.2.1, as variações de limiar foram realizadas para as imagens de fios de náilon nos sistemas WinRhizo, RoMe e TMM. O parâmetro do limiar foi testado a cada onze unidades para todas as imagens, sendo este critério de intervalo baseado em trabalhos correlatos anteriormente citados (MARUYAMA, 2016; NAME, 2013). As configurações de alteração do limiar no sistema WinRhizo encontram-se na Figura 14, seção 3.2.1.

5.1.1 Resultados no sistema WinRhizo

A comparação entre os valores estimados de comprimento apresentados pelo WinRhizo e com as medidas reais dos fios de náilon na primeira fase de análise pode ser observada, em sua totalidade, no Apêndice A, o qual possui o número da amostra (Nº), os comprimentos (C) conhecidos, a medida de comprimento obtida aplicando os limiares, o cálculo do erro percentual; e erro percentual médio, ao final. Limiares que resultaram em erro percentual médio acima de 90% não foram tabelados.

Verificou-se que o limiar 23 teve seu erro relativo percentual médio comprometido pelo resultado das amostras 31 a 34 - Gráfico 1, resultando em 99,45%. No entanto, para as demais, esse limiar foi mais preciso em relação aos outros, alcançando porcentagens de erro tão baixas quanto 0,06%. As amostras 31 a 34 foram submetidas novamente para a análise, porém o resultado não se alterou.

Gráfico 1 – ERP x Amostra para os limiares 12, 23 e 34.



Fonte: O autor

Além do mais, observou-se uma diferença abrupta com relação ao $\overline{\text{ERP}}$ entre o limiar 23 e 34 se estas amostras fossem consideradas para os cálculos, resultando respectivamente em 99,45% e 13,80%.

O Gráfico 1 apresenta ainda as medidas de erros relativos percentuais considerando o limiar 12 para as 50 amostras. Escolheu-se a apresentação dos erros para os limiares 12, 23 e 34 pelo fato de se analisar o limiar anterior e posterior ao possível melhor.

É perceptível que o limiar 12 varia na linha de 100% de erro, o limiar 23 possui em sua maioria ERPs entre 1% e 10%, e o limiar 34 tem resultados que

frequentemente excedem 10%.

Considerando trabalhos correlatos e citados nas seções anteriores, foi definido retirar as amostras de números 31 a 34 para calcular o $\overline{\text{ERP}}$ dos limiares de modo a identificar um limiar aceitável para a maioria das amostras, ou seja, próximo de zero e abaixo de 10%.

Ressalta-se que, para os limiares cujo erro resultou abaixo de 10%, o tempo para medição foi menor em relação aos demais. Essa variação de tempo vai de minutos a segundos, sendo que as mais demoradas alcançaram aproximadamente 4 minutos, e as mais rápidas de 1 a 2 segundos.

No Quadro 3 estão relacionados os limiares e $\overline{\text{ERPs}}$ resultantes desta primeira fase, sem considerar as amostras de números 31 a 34.

Quadro 3 - Análise do ERP médio dos limiares testados no sistema WinRhizo

Limiar	1	12	23	34	45	56	67	78	89	100	111	122	133	144
$\overline{\text{ERP}}$	89,7	100,83	6,21	14,84	29,67	47,20	70,06	90,35	96,06	97,86	99,63	99,99	100	100

Fonte: O autor

O cálculo do menor $\overline{\text{ERP}}$ resultou, ao final da primeira fase de medições e após modificações descritas anteriormente, em 6,21% para o limiar 23, sendo este o valor de limiar escolhido para segunda fase, que realiza as próximas variações de duas em duas unidades, conforme descrito na seção 4.2.1.

Para isso foram elencados os limiares 17, 19, 21, 25, 27 e 29. Os resultados desta segunda fase estão descritos no Apêndice A. As amostras 31 a 34 também foram exclusas do cálculo do $\overline{\text{ERP}}$ nesta variação, para manter um padrão.

O melhor caso do limiar 17 foi para a amostra 23, com ERP de 0,76%, e o pior foi para a amostra 1, com ERP de 2053,54 %. Para o limiar 19 alcançou-se um ERP de 0,40%, para a amostra 3; enquanto que, para a amostra 35, o ERP foi de 1365,95.

O Quadro 4 apresenta dos valores dos $\overline{\text{ERPs}}$ resultantes no sistema WinRhizo considerando os limiares 17, 19, 21, 25, 27 e 29, juntamente com o 23, já medido anteriormente, a fim de facilitar a comparação.

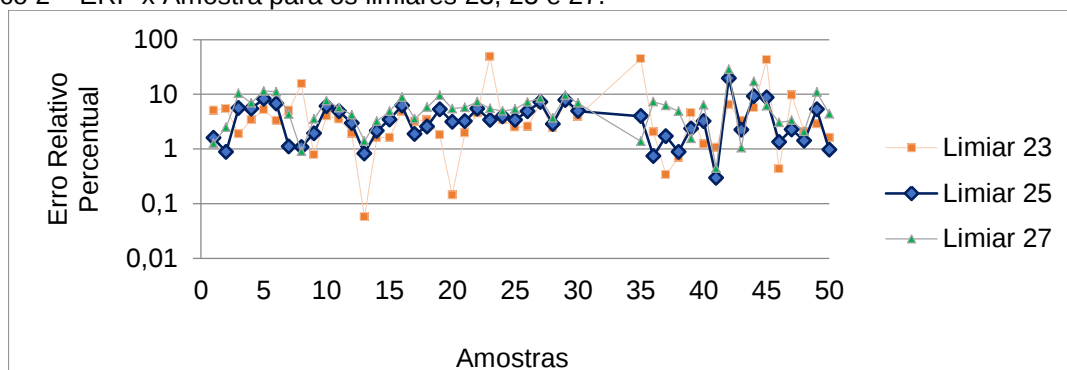
Quadro 4 - Valores obtidos para o ERP médio dos limiares testados na segunda fase no sistema WinRhizo.

Limiar	17	19	21	23	25	27	29
$\overline{\text{ERP}}$	448,73	170,20	38,65	6,21	3,99	6,14	9,20

Fonte: O autor

O valor de limiar que teve melhor desempenho na aferição de comprimento de fios de náilon foi 25, que nesta fase alcançou um $\overline{\text{ERP}}$ de 3,99%, além de ERPs abaixo de 1 % para 6 amostras (Gráfico 2). No entanto, a medida com menor ERP ainda foi a realizada pelo limiar 23, com 0,06% para a amostra 13.

Gráfico 2 – ERP x Amostra para os limiares 23, 25 e 27.



Fonte: O autor

A variação de erro percentual entre os limiares na primeira fase de 23 a 67 foi de 6,21% a 70,06 %. A modificação no erro percentual entre os limiares na segunda fase de 21 a 29 foi de 38,5% a 9,20%.

5.1.2 Resultados no sistema RoMe

Todos os resultados das medições de fios de náilon no sistema RoMe para primeira e segunda fases, com exceção dos limiares com erro percentual médio acima de 90%, podem ser observados no Apêndice B.

Conforme Name (2013, pag. 35), foi aplicado um fator de correção de 0,7611 no sistema RoMe, visto que os comprimentos foram superestimados em seu trabalho. Após a aplicação, Name (2013) demonstrou resultados de erros percentuais abaixo de 10%.

No entanto, para as medidas de amostras de fios de náilon utilizadas nesta dissertação, o sistema não apresentou o mesmo desempenho. Ao realizar as medições, foi verificado que os $\overline{\text{ERPs}}$, em sua totalidade, resultaram acima de 70%.

Verificou-se que as amostras 31 a 34 interferiram novamente nos resultados, assim como no sistema WinRhizo, mostrando valores nitidamente discrepantes aos demais no caso do limiar 23. No Quadro 5 há um resumo dos erros percentuais médios dos resultados da primeira fase de medição.

Quadro 5 - Análise do ERP médio dos limiares testados no sistema RoMe, sendo (a) os resultados considerando a amostras 31 a 34, e (b) desconsiderando as amostras 31 a 34.

Limiar	1	12	23	34	45	56	67	78	89	100	111	122	133	144
ERP (a)	100	92,19	89,59	72,61	75,17	77,29	78,08	78,63	79,31	81,13	86,08	91,44	95,09	96,03
ERP (b)	100	91,52	70,95	74,45	76,69	78,56	79,27	79,83	80,55	82,35	87,45	92,13	95,14	96,10

Fonte: O autor

Na totalidade das amostras, o limiar 34 teve melhor desempenho apresentando erro relativo percentual médio de 72,61%. Porém, desconsiderando as citadas anteriormente, esse erro é de 74,45%.

O limiar 23, para todas as amostras, apresenta $\overline{\text{ERP}}$ de 89,59 %, entretanto, foi identificado como melhor limiar desta fase, pois ao excluir as amostras 31 a 34 de seus resultados, obteve-se $\overline{\text{ERP}}$ de 70,95%. Visando manter-se um padrão, as amostras 31 a 34 serão desconsideradas.

Dando prosseguimento nas análises, o limiar 23 foi elencado para realizar as próximas variações de duas em duas unidades conforme descrito na seção 4.2. O Quadro 6 demonstra as medidas $\overline{\text{ERP}}$ s resultantes no sistema RoMe considerando os limiares 17, 19, 21, 25, 27 e 29, juntamente com o 23, já medido anteriormente, a fim de facilitar a comparação.

Quadro 6 - Análise do ERP médio dos limiares testados na segunda fase no sistema RoMe

Limiar	17	19	21	23	25	27	29
ERP	145,43	88,34	69,72	70,95	72,55	73,10	73,37

Fonte: O autor

O valor de limiar que teve melhor desempenho na aferição de comprimento de fios de náilon foi 21, que nesta fase alcançou $\overline{\text{ERP}}$ de 69,72%.

A variação de erro percentual entre os limiares na primeira fase, de 23 a 67, foi de 70,95% a 79,69%. A modificação no erro percentual entre os limiares na segunda fase, de 21 a 29, foi de 69,72% a 73,37%.

5.1.3 Resultados no sistema TMM

Todos os resultados das medições de fios de náilon no sistema TMM para primeira e segunda fase, com exceção dos limiares com erro percentual médio acima de 90%, podem ser observados no Apêndice C.

Verificou-se que as amostras 31 a 34 interferiram novamente nos resultados, assim como no sistema WinRhizo e RoMe, mostrando valores discrepantes aos demais.

Na totalidade das amostras, o limiar 34 teve melhor desempenho apresentando erro relativo percentual médio de 11,97%. Porém, desconsiderando as amostras citadas anteriormente, esse erro é de 12,68%.

Prosseguindo as análises, o valor de limiar 23 foi identificado como melhor limiar desta fase, pois, ao excluir as amostras 31 a 34 de seus resultados, obteve-se $\overline{\text{ERP}}$ de 11,35%. No Quadro 7 há um resumo dos erros percentuais médios dos resultados da primeira fase de medição.

Quadro 7 - Análise do ERP médio dos limiares testados no sistema TMM, sendo (a) os resultados considerando a amostras 31 a 34, e (b) desconsiderando as amostras 31 a 34.

Limiar	1	12	23	34	45	56	67	78	89	100	111	122	133	144
$\overline{\text{ERP}}$ (a)	100	125,81	195,19	11,97	25,43	42,75	69,94	89,92	95,74	98,07	99,74	99,99	100	100
$\overline{\text{ERP}}$ (b)	100	128,06	11,35	12,68	27,52	45,51	72,43	91,45	96,17	98,07	99,72	99,99	100	100

Fonte: O autor

O limiar 23 foi elencado para realizar as próximas variações de duas em duas unidades, conforme estabelecido na seção 4.2.1.

O Quadro 8 apresenta as medidas $\overline{\text{ERP}}$ s resultantes no sistema TMM considerando os limiares 17, 19, 21, 25, 27 e 29, juntamente com o 23, já medido anteriormente, a fim de facilitar a comparação.

Quadro 8 - Análise do ERP médio dos limiares testados na segunda fase no sistema TMM

Limiar	17	19	21	23	25	27	29
$\overline{\text{ERP}}$	982,47	452,06	83,29	11,35	4,12	4,45	6,22

Fonte: O autor

O valor de limiar que teve melhor desempenho na aferição de comprimento

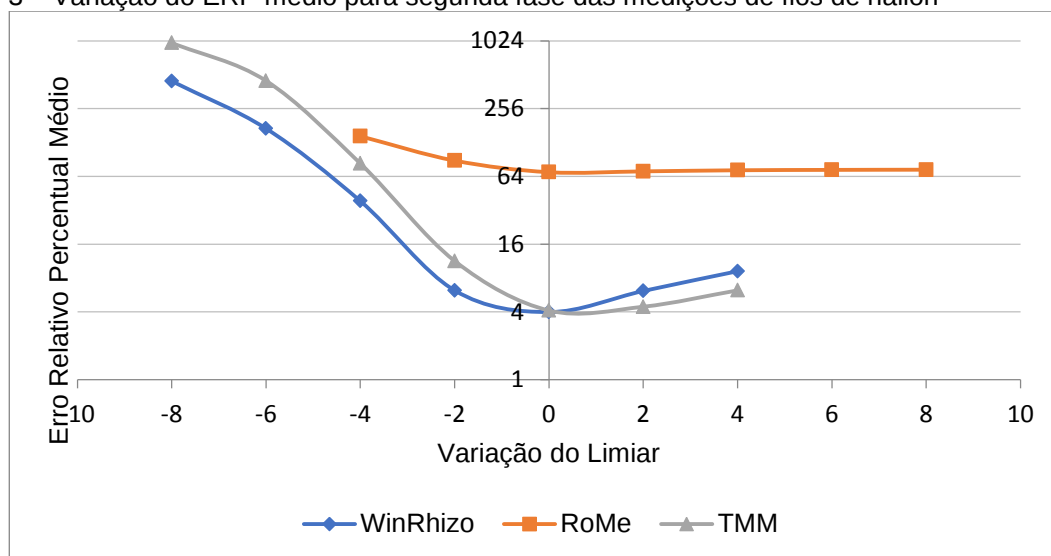
de fios de náilon foi 25, que nesta fase alcançou $\overline{ERP}$ de 4,12%.

A variação de erro percentual entre os limiares na primeira fase, de 23 a 67, foi de 11,65% a 72,43%. A mudança no erro percentual entre os limiares na segunda fase, de 21 a 29, foi de 83,29 % a 6,22%.

5.1.4 Sensibilidade dos softwares WinRhizo, RoMe e TMM para fios de náilon

O Gráfico 3 apresenta a relação entre o valor de limiar (em escala linear) e o erro percentual médio da segunda fase (em escala logarítmica) de medições para os sistemas WinRhizo, RoMe e TMM. O valor de limiar adequado foi considerado como referência (valor zero no eixo limiar) e os demais valores são as variações para mais ou menos deste valor.

Gráfico 3 – Variação do ERP médio para segunda fase das medições de fios de náilon



Fonte: O autor.

Percebe-se que os sistemas WinRhizo e TMM apresentam comportamento similar, com uma variação de erro percentual mais acentuada do que o sistema RoMe.

Entretanto, o sistema RoMe permanece a maior parte da variação da segunda fase com erros percentuais próximos de 65%, enquanto que o WinRhizo e o TMM saem de erros excedentes a 400% (para desvios do valor de limiar adequado superiores a -10) para próximos de 4% (valor de limiar adequado).

Além disso, o sistema TMM possui menor variação de erro na faixa dos

limiares 25 a 29 comparado ao WinRhizo, que ultrapassa a linha dos 8%. Adicionalmente, errar o valor de limiar de duas unidades para menos, em relação ao valor de limiar adequado encontrado, representa um acréscimo no erro percentual maior que 2,2%, 7,2%, e 18,6% para os sistemas WinRhizo, TMM e RoMe, respectivamente; e errar o valor de limiar de duas unidades para mais, em relação ao valor de limiar adequado encontrado, representa um acréscimo no erro percentual maior que 2,2%, 0,3%, e 1,2% para os sistemas WinRhizo, TMM e RoMe, respectivamente.

No geral, é possível perceber que a variação de 4 unidades a mais do limiar adequado encontrado acarreta em erros que não ultrapassam 6% de diferença, para os sistemas TMM e WinRhizo. O sistema RoMe permanece na mesma faixa e variação, entre 69% e 72%, aproximadamente.

Nota-se uma faixa estreita de no máximo seis limiares acima e abaixo do melhor para os sistemas TMM e WinRhizo para que se tenha resultados abaixo ou próximo de 16% de erro nesses sistemas.

5.1.5 Amostras 31 a 34

No trabalho de Narisetti *et al.* (2019), cinco das cem amostras ficaram aquém dos resultados obtidos com a limiarização automática, com coeficiente de similaridade de dados abaixo de 0,25, sendo que a maioria alcançou 0,82. Esse é um exemplo da dificuldade em tentar obter um padrão na medição de raízes, já comentada no início desta dissertação, pois cada imagem e cada tipo de raiz tem sua dificuldade para ser medida, mesmo com características semelhantes às demais, e até mesmo sendo tratada de maneira individual pelos algoritmos treinados, como foi o caso do trabalho citado.

Nesta dissertação observou-se esse fato mesmo no modo de limiarização manual, considerando um único limiar aplicado para um espaço amostral com raízes de uma mesma cultura, adquiridas nas mesmas configurações.

As amostras 31 a 34 são compostas por fios de náilon de 0,25 mm de diâmetro, com um a quatro metros de comprimento, variando de um em um metro. No Quadro 9 encontram-se os erros percentuais médios obtidos nas imagens dessas amostras, na primeira fase de variação de limiar do sistema WinRhizo.

Quadro 9 – ERP médio dos limiares testados no sistema WinRhizo para amostras 31 a 34

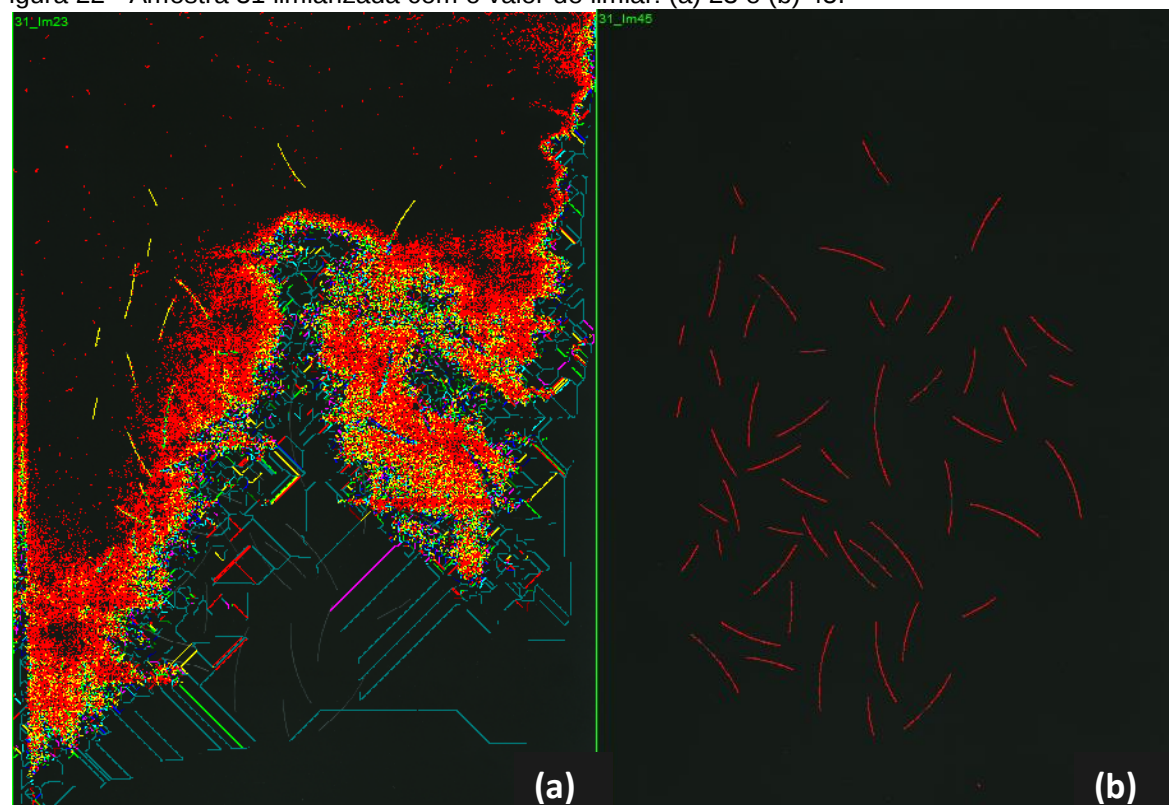
	1	12	23	34	45	56	67	78	89	100	111	122
31	111,41	70,39	2014,07	3,40	1,26	13,60	52,34	73,37	92,17	99,98	100,00	100,00
32	46,33	85,20	1363,34	2,45	1,07	10,64	32,40	59,54	81,09	94,88	99,45	100,00
33	17,14	90,13	728,55	1,34	3,29	10,73	28,90	58,17	83,62	95,29	99,97	100,00
34	31,91	92,60	580,89	0,10	3,61	17,71	51,54	85,12	97,09	99,50	100,00	100,00
ERP	51,70	84,58	1171,71	1,82	2,31	13,17	41,29	69,05	88,49	97,41	99,85	100,00

Fonte: O autor

No sistema WinRhizo, o menor erro percentual médio se deu ao valor de limiar 34, com 1,82%, alcançando 0,10% de erro para a amostra 34 e 1,34% para a amostra 33. Ainda assim, para as amostras 31 e 32, o melhor limiar encontrado foi o 45, com 1,26% e 1,07% de erro, respectivamente.

Na Figura 22 é demonstrado o resultado da limiarização no sistema WinRhizo, antes de efetuar a medição. A Figura 22 (a) corresponde a amostra 31 e valor de limiar 23, enquanto que a Figura 22 (b) é o resultado da limiarização para a mesma amostra utilizando o limiar 45.

Figura 22 - Amostra 31 limiarizada com o valor de limiar: (a) 23 e (b) 45.

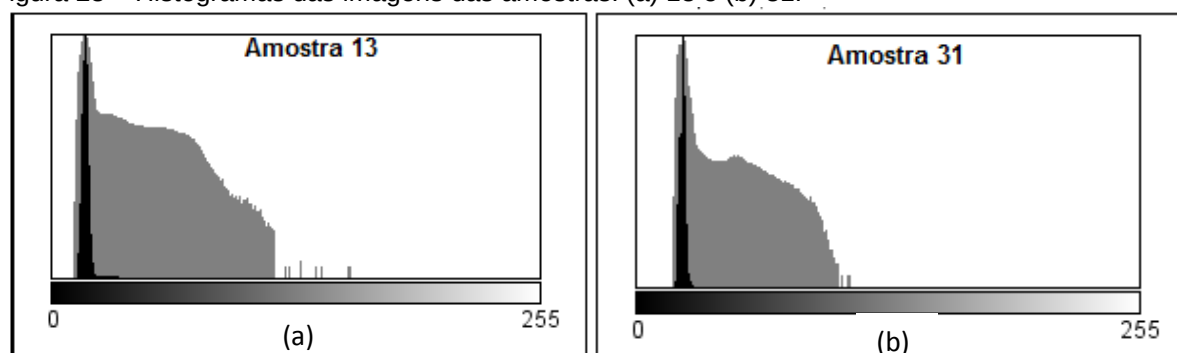


Fonte: O autor

Diferentemente do que ocorre na Figura 22 (b), onde as raízes estão discriminadas do fundo, na Figura 22 (a) não tem um padrão definido, como se algumas partes do fundo tivessem sido selecionadas como raízes.

A Figura 23 compara os histogramas, em escala logarítmica, das imagens das amostras 13 e 31, sendo que a imagem da amostra 13, Figura 23 (a), alcançou 0,06 % de erro com o limiar 23 aplicado no sistema WinRhizo.

Figura 23 – Histogramas das imagens das amostras: (a) 13 e (b) 31.



Fonte: O autor

Percebe-se que o histograma da Figura 23 (a) tem sempre um declínio na probabilidade de tons de cinza, de acordo com a variação, principalmente nos tons mais escuros. Isso indica que o objeto alvo e o fundo não são facilmente discriminados.

Para a imagem da amostra 31, Figura 23 (b), o histograma apresenta um segundo pico, indicando que os pixels correspondentes às raízes estejam um pouco a frente que da amostra 13, com a possibilidade de maior distinção entre o fundo e o objeto alvo, corroborando com o melhor resultado no limiar 45.

Entretanto, essa análise fica subjetiva ao método de segmentação utilizado pelo sistema em questão, pois o processamento é realizado com base no histograma como um todo.

No Quadro 10 encontram-se os erros percentuais médios nas imagens dessas amostras na primeira fase de variação de limiar do sistema RoMe.

No sistema RoMe, o menor erro percentual médio alcançado para estas imagens foi de 51,45% no limiar 34, sendo que para a imagem da amostra 31 alcançou-se 5,12%.

O sistema RoMe não identificou nenhum objeto nos limiares 1 e 12, porém não emitiu nenhuma mensagem. Apenas colocava-se para medir a amostra sem

resposta do software.

Quadro 10 – ERP médio dos limiares testados no sistema RoMe para amostras 31 a 34

	1	12	23	34	45	56	67	78	89	100	111	122
31	100,00	100,00	401,96	5,12	21,16	32,94	37,85	39,37	41,00	46,59	56,49	87,32
32	100,00	100,00	281,80	52,80	59,41	61,68	61,55	61,87	61,73	62,44	62,46	81,17
33	100,00	100,00	283,34	69,13	71,42	74,53	76,19	76,00	75,40	76,72	77,77	80,82
34	100,00	100,00	248,75	78,75	78,91	81,68	81,71	82,08	81,98	82,69	84,50	84,87
ERP%	100,00	100,00	303,96	51,45	57,73	62,71	64,32	64,83	65,03	67,11	70,31	83,55

Fonte: O autor

No Quadro 11 encontram-se os erros percentuais médios nas imagens dessas amostras na primeira fase de variação de limiar do sistema TMM.

Quadro 11 - ERP médio dos limiares testados no sistema TMM para amostras 31 a 34

	1	12	23	34	45	56	67	78	89	100	111
31	100,00	100,00	3677,51	4,92	2,12	12,01	53,06	75,56	95,18	100,00	100,00
32	100,00	100,00	2234,10	4,43	2,41	8,13	31,56	62,72	83,49	95,93	100,00
33	100,00	100,00	1887,63	2,10	0,50	7,85	27,38	62,19	86,39	96,58	100,00
34	100,00	100,00	1438,47	3,77	0,28	15,83	53,37	88,85	97,85	99,86	100,00
ERP%	100,00	100,00	2309,43	3,80	1,33	10,95	41,34	72,33	90,73	98,09	100,00

Fonte: O autor

No sistema TMM, o menor erro percentual médio alcançado para as imagens dessas amostras foi de 1,33% também no limiar 45, sendo que, para a imagem da amostra 34, alcançou-se 0,28%. O sistema TMM não identificou nenhum objeto nos limiares 1 e 12, e depois do 111, emitindo uma mensagem para informar o usuário.

5.1.6 Análise do desvio padrão e do coeficiente de determinação

No Quadro 12 é possível observar o erro percentual relativo percentual (ERP%), o desvio padrão (DP) e o coeficiente de determinação (R^2) calculados nos limiares testados para os três sistemas, com amostras de fios de náilon, excluindo-se as amostras 31 a 34 da análise.

Para o intervalo de limiares com erros percentuais médios abaixo de 10%, o sistema WinRhizo gerou desvio padrão entre 3% e 11%, correspondente aos limiares 23 a 29; já no TMM, o desvio padrão ficou entre 5% e 8%, aproximadamente, para o intervalo de limiares entre 25 e 29. Os melhores erros percentuais médios para sistema RoMe ficaram próximos a 70%, com desvio padrão em torno de 23 %, que correspondem aos limiares entre 23 e 29.

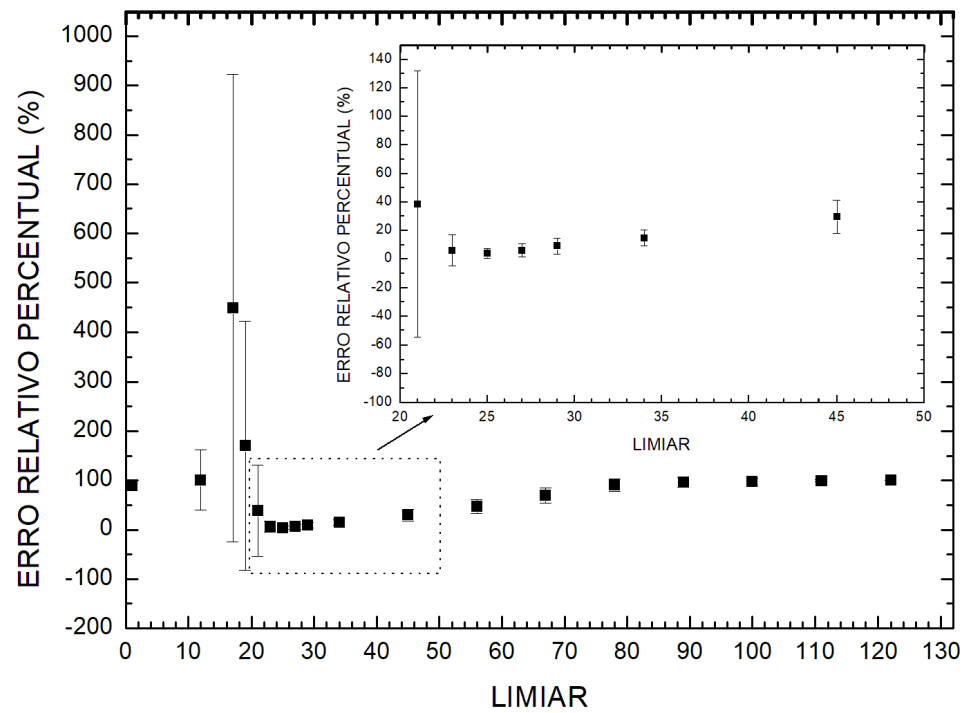
De fato, o desvio padrão, quando associado apenas ao erro relativo percentual médio, não permite identificar um único valor de limiar adequado, pois as faixas de desvio estão sobrepostas, como pode ser observado nos Gráficos 4, 5 e 6 para os sistemas WinRhizo, TMM e RoMe, respectivamente. Portanto, foi analisado o coeficiente de determinação (R^2), para cada limiar, juntamente com esses dados, para avaliar a dispersão entre os comprimentos medidos e estimados e delimitar um intervalo de limiares adequados para os três sistemas.

Quadro 12 – ERP médio, desvio padrão (DP) e coeficiente de determinação (R^2) para limiares testados com fios de náilon

	Limiar	12	17	19	21	23	25	27	29	34	45	56	67	78	89	100	111	122
WinRhizo	$\overline{\text{ERP}}$	100,83	448,73	170,20	38,65	6,21	3,99	6,14	9,20	14,84	29,67	47,20	70,06	90,35	96,06	97,86	99,63	99,99
	DP	61,27	473,52	252,14	93,18	10,84	3,34	4,77	5,56	5,65	11,46	14,27	15,61	12,67	9,64	7,11	1,69	0,09
	R^2	0,147	0,556	0,635	0,814	0,965	0,998	0,999	0,998	0,997	0,992	0,911	0,938	0,594	0,051	0,015	0,009	0,017
TMM	$\overline{\text{ERP}}$	128,06	982,47	452,06	83,29	11,35	4,12	4,45	6,22	12,68	27,52	45,51	72,43	91,45	96,17	98,07	99,72	99,99
	DP	122,69	969,88	679,69	198,32	23,06	5,01	6,11	7,81	6,18	12,47	14,85	16,04	12,88	9,83	6,42	0,94	0,03
	R^2	0,119	0,378	0,447	0,617	0,891	0,996	0,999	0,998	0,996	0,991	0,979	0,914	0,447	0,022	0,017	0,003	0,003
RoMe	$\overline{\text{ERP}}$	91,52	145,43	88,34	69,72	70,95	72,55	73,10	73,37	74,45	76,69	78,56	79,27	79,83	80,55	82,35	87,45	92,13
	DP	19,91	155,89	113,85	31,98	21,83	23,20	22,76	22,67	21,16	18,92	16,23	15,32	14,84	14,03	12,80	12,48	11,16
	R^2	0,1383	0,5393	0,3090	0,1448	0,2233	0,5092	0,5176	0,5298	0,5477	0,6001	0,6287	0,6247	0,6469	0,6924	0,7237	0,5866	0,1341

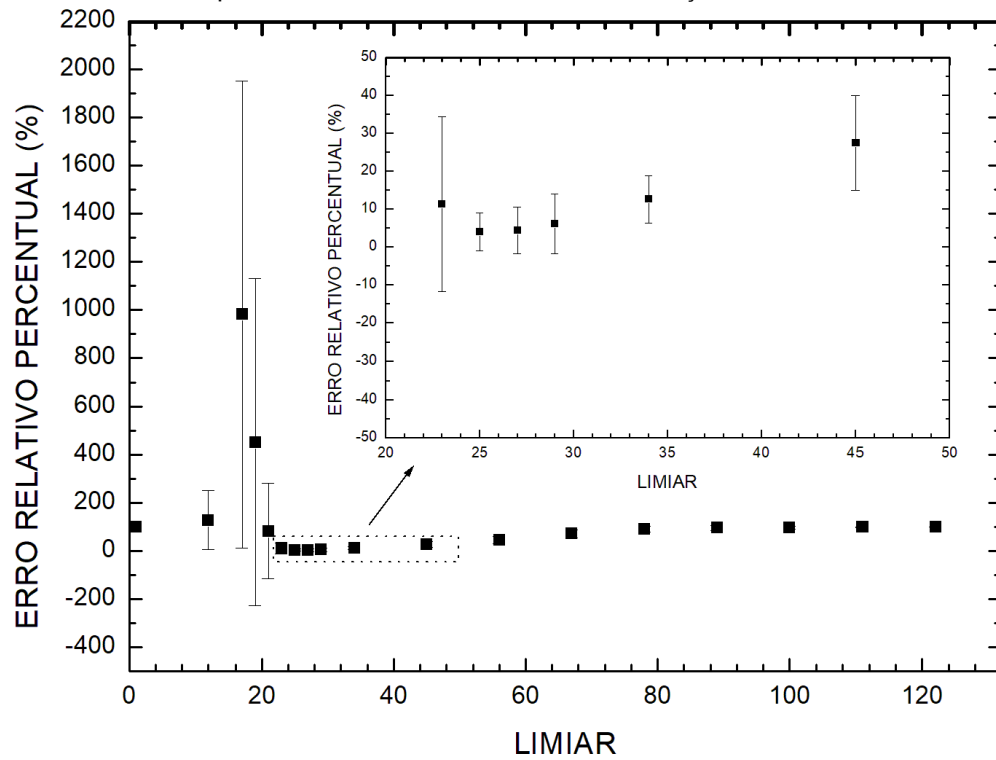
Fonte: O autor

Gráfico 4 – ERP e seu DP para limiares no sistema WinRhizo em medições de fios de náilon



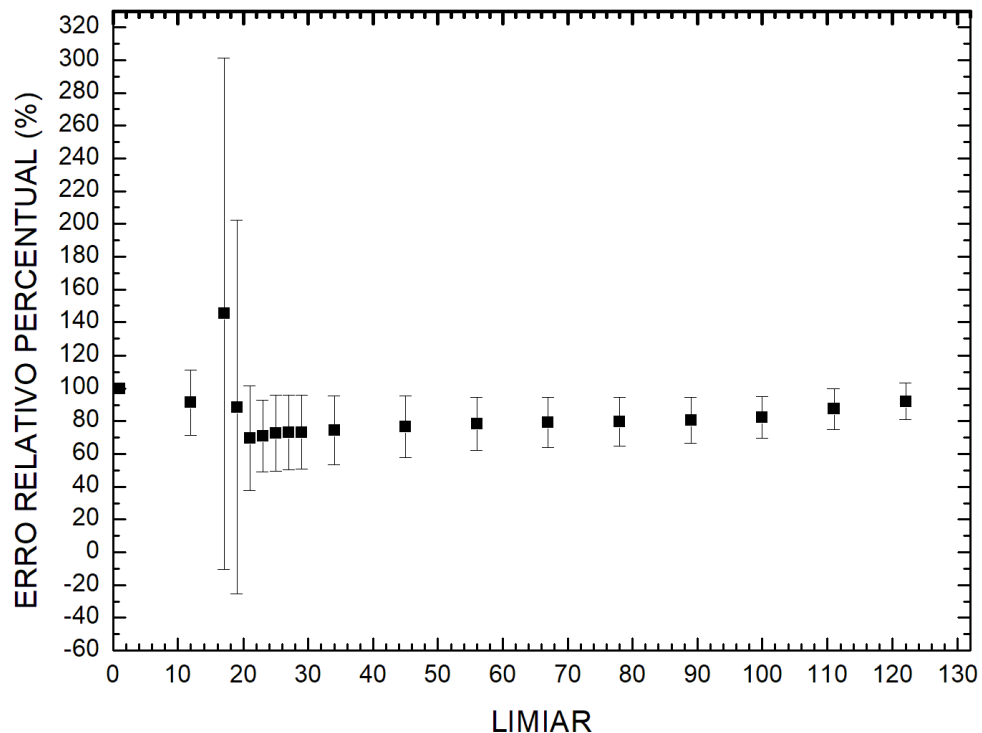
Fonte: O autor

Gráfico 5 - ERP e seu DP para limiares no sistema TMM em medições de fios de náilon



Fonte: O autor

Gráfico 6 - ERP e seu DP para limiares no sistema RoMe em medições de fios de náilon



Fonte: O autor

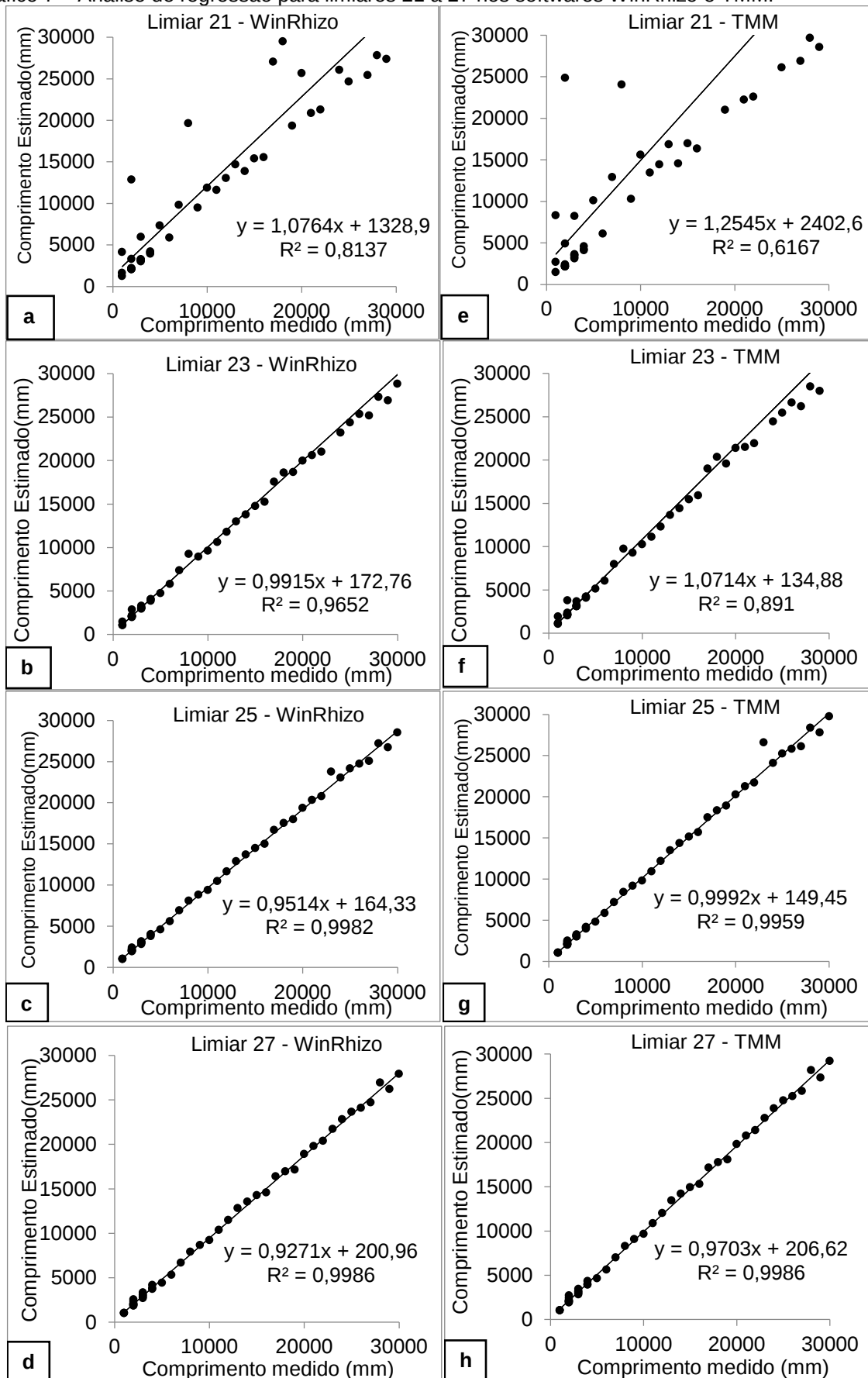
A análise de regressão foi aplicada aos limiares 21, 23, 25 e 27 nos sistemas WinRhizo, respectivamente no Gráfico 7 (a, b, c, d), e TMM, respectivamente no Gráfico 7 (e, f, g, h), a fim de observar a brusca dispersão dos dados entre estes limiares.

Enquanto que os Gráficos 7(a) e 7(e) apresentam as maiores dispersões de dados, com coeficientes de determinação de 0,8137 e 0,6167, os Gráficos 7(b) e 7(f) indicam que as amostras próximas de 3 metros são as que se distanciaram do valor estimado; porém, os coeficientes de determinação de 0,9652 e 0,8910, demonstram melhores coeficientes de determinação comparado ao limiar anterior.

No sistema WinRhizo, o limiar que possui o menor erro relativo percentual e com coeficiente de determinação de 0,9982 é o 25, Gráfico 7(c), e se assemelha ao do limiar 27, Gráfico 7(d), que possui o melhor coeficiente de determinação de 0,9986.

O mesmo ocorre para o sistema TMM. O limiar que possui o menor erro relativo percentual neste sistema é o 25, Gráfico 7(g), com coeficiente de determinação de 0,9982, e se assemelha ao do limiar 27, Gráfico 7(d), que apresenta o melhor coeficiente de determinação neste software, com 0,9986.

Gráfico 7 – Análise de regressão para limiares 21 a 27 nos softwares WinRhizo e TMM.



Fonte: O autor

Através desta análise de regressão, os desvios padrões, como podem ser observados nos Gráficos 4 a 6, quando associados apenas ao erro relativo percentual médio, não permitem identificar um único valor de limiar adequado, pois as faixas de desvio padrão estão sobrepostas.

Analizando novamente o Quadro 12, com relação ao coeficiente de determinação (R^2), nota-se que aqueles mais próximos a 1, indicando pequena dispersão dos dados com relação a linha de regressão ajustada, estão na faixa dos limiares entre 25 a 45, com valores acima de 0,99, tanto para o sistema WinRhizo quanto para o TMM. Nesses sistemas, associando R^2 com os menores $\overline{ERP}\%$ e DP, a faixa definida como adequada para medição de fios de náilon é do limiar 25 ao 29. Logo, para a faixa de valores de limiares considerados adequados, tem-se erro de medida entre 4% e 9%, para o sistema WinRhizo e entre 4% e 6%, para o sistema TMM.

Para o sistema RoMe, o coeficiente de determinação mais próximo de 1 foi o 0,7237 para o limiar 100, porém com 82% de erro percentual médio. Assim, para esse sistema, em medição de fios de náilon, a faixa de limiares adequada mantém-se aquela indicada anteriormente, para $\overline{ERPs}\%$ próximos a 70% e desvios padrão em torno de 23%, que correspondem aos limiares entre 23 e 29.

5.2 RAÍZES

O parâmetro do limiar definido como adequado para fios de náilon foi aplicado nas imagens de raízes lavadas e analisado seu desempenho nos sistemas WinRhizo, RoMe e TMM - sem considerar a Seção 5.1.6. Caso resultasse em erro percentual médio acima dos encontrados para os fios, seriam realizadas as mesmas variações de limiar executadas na seção anterior nos três sistemas, de modo a encontrar um limiar adequado para as imagens adquiridas.

5.2.1 Resultados no sistema WinRhizo

Todos os resultados das medições de raízes no sistema WinRhizo, com exceção dos limiares com erro percentual médio acima de 90%, podem ser observados no Apêndice D.

Na análise de fios de náilon, o valor de limiar que teve melhor desempenho encontrado no sistema WinRhizo foi 25, com $\overline{\text{ERP}}$ de 3,99%. Aplicando-se esse limiar para medir as amostras de raízes de milho, o $\overline{\text{ERP}}$ encontrado foi de 40,41%.

De modo a buscar um valor de $\overline{\text{ERP}}$ que resultasse abaixo de 40,41%, de preferência próximo do mesmo desempenho do sistema para fios de náilon, as amostras de raízes de milho foram submetidas a limiares intervalados a 11 unidades – Quadro 13, assim como na metodologia descrita na Seção 4.2.2. Foram tabelados apenas resultados relevantes para análise.

Quadro 13 - ERP médio dos limiares para amostras de raízes de milho no sistema WinRhizo

Limiar	12	23	34	45	56	67	78
$\overline{\text{ERP}}$	108,98	89,47	29,28	19,21	77,69	98,61	99,99

Fonte: O autor

Percebeu-se que o limiar 45 obteve melhor desempenho entre os demais, com 19,21% de erro percentual médio. Dentre as trinta amostras, sete obtiveram erros percentuais abaixo de 10%; dez entre 10% e 20%; e as restantes limitadas a 41% de erro.

Prosseguindo com o método descrito, efetuando-se variações de 5 unidades a mais e a menos do limiar 45, com passo de uma unidade, obteve-se os resultados apresentados no Quadro 14.

Quadro 14- ERP médio dos limiares para amostras de raízes de milho no sistema WinRhizo

Limiar	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
$\overline{\text{ERP}}$	15,00	13,95	13,28	14,39	16,47	19,21	23,26	28,35	34,04	40,45	46,82

Fonte: O autor

O valor de limiar que alcançou menores erros para aferição do comprimento das raízes foi 42, com 13,28% na média, para as trinta amostras submetidas, sendo que, destas, sete alcançaram erros abaixo de 5%.

5.2.2 Resultados no sistema RoMe

Todos os resultados das medições de raízes no sistema RoMe, com exceção

dos limiares com erro percentual médio acima de 90%, podem ser observados no Apêndice E.

Na análise de fios de náilon, o valor de limiar que teve melhor desempenho encontrado no sistema RoMe foi 21, com $\overline{\text{ERP}}$ de 69,72%. Aplicando-se esse limiar para medir as amostras de raízes de milho, o $\overline{\text{ERP}}$ encontrado foi de 79,44%.

De modo a buscar um valor de $\overline{\text{ERP}}$ que resultasse próximo do mesmo desempenho do sistema para fios de náilon, as amostras de raízes de milho foram submetidas a limiares intervalados a 11 unidades – Quadro 15, assim como na metodologia descrita na Seção 4.2. Foram tabelados apenas resultados relevantes para análise.

Quadro 15- ERP médio dos limiares para amostras de raízes de milho no sistema RoMe

Limiar	23	34	45	56	67	78
ERP	45,88	36,84	71,49	80,21	80,53	80,35

Fonte: O autor

Percebeu-se que o valor de limiar 34 obteve melhor desempenho entre os demais, com 36,84% de erro percentual médio. O sistema RoMe não identificou raízes ao se utilizar os limiares 1 e 12.

Prosseguindo com o método descrito, efetuando-se variações de 5 unidades a mais e a menos do limiar 34, obteve-se os resultados apresentados no Quadro 16.

Quadro 16 - ERP médio dos limiares para amostras de raízes de milho no sistema RoMe

Limiar	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39
ERP	33,22	33,68	36,62	35,27	37,18	39,28	42,35	45,56	48,86	50,53	50,73

Fonte: O autor

O valor de limiar que alcançou menores erros para aferição do comprimento das raízes foi 29, com 32,91% na média, para as trinta amostras submetidas.

5.2.3 Resultados no sistema TMM

Todos os resultados das medições de raízes no sistema TMM, com exceção dos limiares com erro percentual médio acima de 90%, podem ser observados no

Apêndice F.

Na análise de fios de náilon, o valor de limiar que teve melhor desempenho encontrado no sistema TMM foi 25, com $\overline{\text{ERP}}$ de 4,12%. Aplicando-se esse limiar para medir as amostras de raízes de milho, o $\overline{\text{ERP}}$ encontrado foi de 87,4%.

De modo a buscar um valor de $\overline{\text{ERP}}$ que resultasse próximo do mesmo desempenho do sistema para fios de náilon, as amostras de raízes de milho foram submetidas a limiares intervalados a 11 unidades – Quadro 17, assim como na metodologia descrita na Seção 4.2.2. Foram tabelados apenas resultados relevantes para análise.

Quadro 17 - ERP médio dos limiares para amostras de raízes de milho no sistema TMM

Limiar	12	23	34	45	56
$\overline{\text{ERP}}$	98,86	49,63	41,70	21,33	82,94

Fonte: O autor

Percebeu-se que o valor de limiar 45 obteve melhor desempenho entre os demais, com 21,33% de erro percentual médio. O sistema TMM emitia uma mensagem quando não identificava raízes ao se utilizar dos limiares que excediam 100% de erro.

Prosseguindo com o método descrito, efetuando-se variações de 5 unidades a mais e a menos do limiar 34, obteve-se os resultados do Quadro 18.

Quadro 18 - ERP médio dos limiares para amostras de raízes de milho no sistema TMM

Limiar	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
$\overline{\text{ERP}}$	32,99	19,71	18,42	17,70	19,09	21,33	25,35	30,80	37,41	44,44	50,68

Fonte: O autor

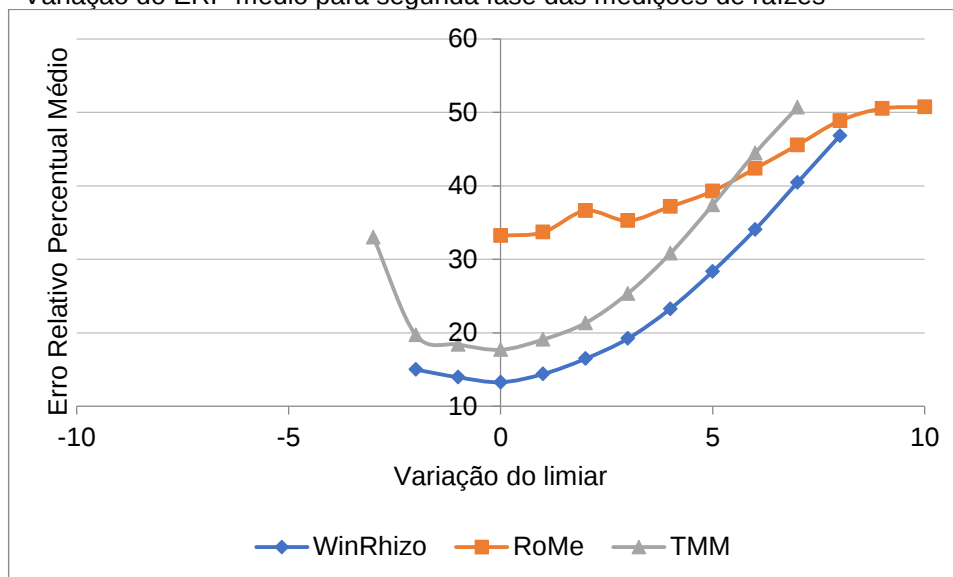
O valor de limiar que alcançou menores erros para aferição do comprimento das raízes foi 43, com 17,7% na média para as trinta amostras submetidas.

5.2.4 Sensibilidade dos softwares WinRhizo, RoMe e TMM para raízes

O Gráfico 8 apresenta a relação entre o valor de limiar (escala linear) e o erro percentual médio da segunda fase de medições (escala linear) para os sistemas

WinRhizo, RoMe e TMM. O valor de limiar adequado foi considerado como referência (valor zero no eixo limiar) e os demais valores são as variações para mais ou menos deste valor.

Gráfico 8 – Variação do ERP médio para segunda fase das medições de raízes



Fonte: O autor.

Percebe-se novamente que os sistemas WinRhizo e TMM apresentam comportamento similar, com uma variação de erro percentual mais acentuada do que o sistema RoMe.

Entretanto, diferentemente dos fios de náilon, o sistema RoMe apresenta um crescimento linear do erro percentual em relação ao valor de limiar adequado encontrado, sendo que o menor erro obtido foi de 33,2%. Os sistemas WinRhizo e o TMM saem de erros excedentes a 50% (para desvios do valor de limiar adequado superiores a +8) para próximos de 13% (valor de limiar adequado).

Além disso, errar o valor de limiar de duas unidades para menos, em relação ao valor de limiar adequado encontrado, representa um acréscimo no erro percentual maior que 1,7% e 2,0% para os sistemas WinRhizo e TMM; e errar o valor de limiar de duas unidades para mais, em relação ao valor de limiar adequado encontrado, representa um acréscimo no erro percentual maior que 3,2%, 3,6 %, e 3,4% para os sistemas WinRhizo, TMM e RoMe, respectivamente.

No geral, é possível notar que a variação de dez unidades a mais do limiar adequado encontrado acarreta em erros que chegam a 50%. Nota-se uma faixa

estreita de no máximo dois limiares acima e abaixo do melhor para os sistemas TMM e WinRhizo para que se tenha resultados abaixo ou próximo de 20% de erro.

5.2.5 Análise do desvio padrão e do coeficiente de determinação

Nos Quadros 19 e 20 é possível observar o erro percentual relativo percentual médio ($\overline{ERP}\%$), o desvio padrão (DP) e o coeficiente de determinação (R^2) calculados nos limiares testados para os três sistemas, com amostras de raízes de milho. O Quadro 19 contém os sistemas WinRhizo e TMM juntos, pois na primeira e segunda fase de medidas os limiares coincidiram.

Para o intervalo de limiares com erros percentuais médios abaixo de 20%, o desvio padrão para o sistema WinRhizo permaneceu entre 10% e 14%, aproximadamente, e para o sistema TMM o desvio padrão variou de 13% a 15%, aproximadamente, sendo que os limiares desses resultados são entre 40 a 45 no WinRhizo e entre 41 a 44 no TMM.

No sistema RoMe - Quadro 20, os menores erros percentuais médios, abaixo de 35%, foram para os limiares 29 e 30, com o desvio padrão próximo a 20%.

Assim como na análise dos fios de náilon, foi observado que não é possível definir um único limiar adequado, visto que os desvios padrões dos limiares com menores erros percentuais médios se sobrepõem – Gráficos 9 a 11. Portanto, foi também analisado o coeficiente de determinação (R^2), para cada limiar, juntamente com esses dados, para avaliar a dispersão entre os comprimentos medidos e estimados e delimitar um intervalo de limiares adequados para os três sistemas.

De acordo com o Quadro 19, nota-se que os valores de coeficiente de determinação (R^2) mais próximos a 1, neste caso, acima de 0,93, estão na faixa dos limiares entre 34 e 44, com valores variando entre 0,933 a 0,965 para o sistema WinRhizo. No sistema TMM, os melhores coeficientes de determinação estão entre 0,943 e 0,967, nos valores de limiares 25, 34, e 41 a 43.

Nesses sistemas, associando R^2 com os menores $\overline{ERP}\%$ e DP, a faixa definida como adequada para medição de raízes de milho foi do limiar 40 ao 44, para o sistema WinRhizo, e do limiar 41 ao 43, para o sistema TMM.

Quadro 19 – ERP médio, desvio padrão (DP) e coeficiente de determinação (R^2) para limiares testados com raízes de milho no WinRhizo(W) e TMM(T)

	Limiar	1	12	23	25	34	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	56	67	78
W	ERP	94,51	108,98	89,47	48,41	29,28	15,00	13,95	13,28	14,39	16,47	19,21	23,26	28,35	34,04	40,45	46,82	77,69	98,61	99,99
	DP	3,94	66,35	188,82	57,28	12,91	13,45	11,54	10,67	9,99	10,58	12,74	14,45	15,36	15,81	15,07	14,21	8,46	1,30	0,06
	R^2	0,003	0,053	0,386	0,838	0,965	0,952	0,948	0,945	0,939	0,933	0,926	0,917	0,908	0,895	0,883	0,869	0,752	0,338	0,1309
T	ERP	-	96,36	98,86	49,63	41,70	32,99	19,71	18,42	17,70	19,09	21,33	25,35	30,80	37,41	44,44	50,68	82,94	99,29	99,99
	DP	-	15,06	50,33	17,08	18,36	56,46	15,07	12,92	12,59	12,46	14,46	16,33	17,61	17,53	16,28	15,71	7,79	1,01	0,04
	R^2	-	0,034	0,858	0,967	0,964	0,801	0,943	0,937	0,930	0,922	0,913	0,901	0,887	0,851	0,824	0,669	0,198	0,166	0,009

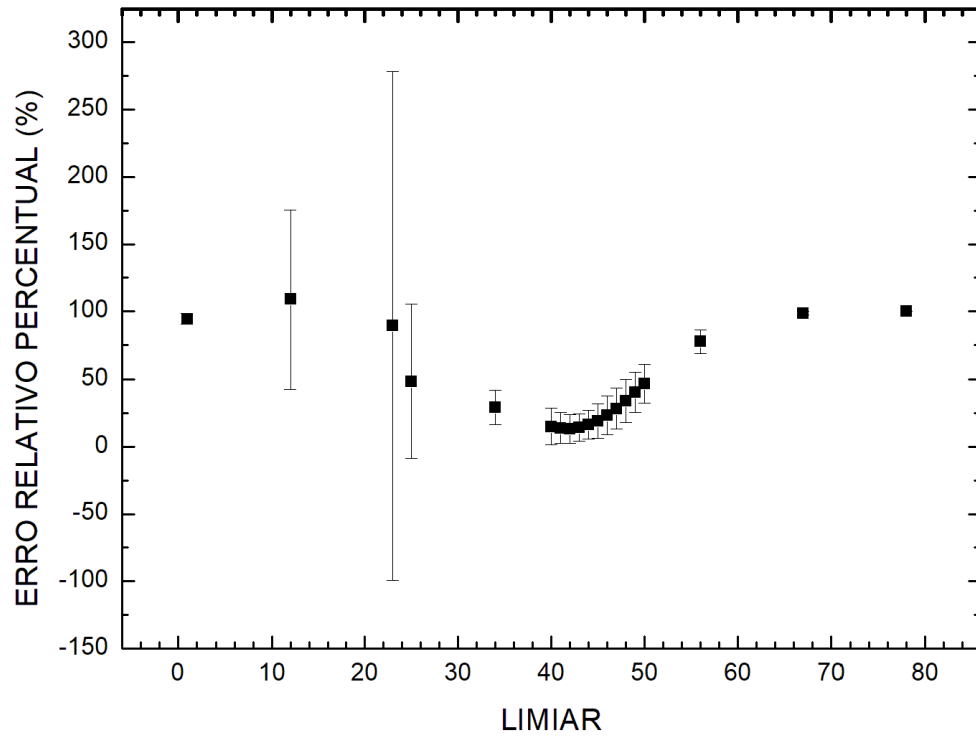
Fonte: O autor

Quadro 20 - ERP médio, desvio padrão (DP) e coeficiente de determinação (R^2) para limiares testados com raízes de milho no RoMe(R)

	Limiar	1	12	23	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	45	56	67	78	89
R	ERP	-	-	45,88	33,22	33,68	36,62	35,27	37,18	36,84	39,28	42,35	45,56	48,86	50,53	71,49	80,21	80,53	80,35	80,06
	DP	-	-	50,66	21,31	20,38	22,73	19,34	20,83	16,55	15,38	14,80	15,36	16,25	19,61	16,47	14,67	14,31	13,17	13,78
	R^2	-	-	0,764	0,825	0,823	0,792	0,825	0,851	0,831	0,816	0,788	0,742	0,690	0,648	0,347	0,024	0,024	0,070	0,023

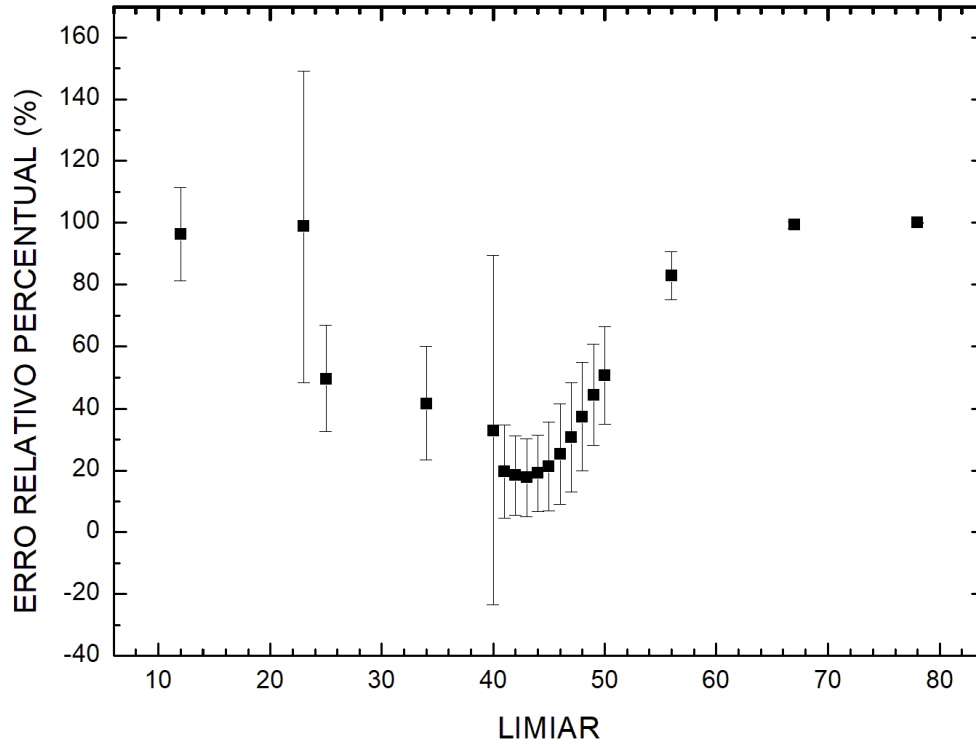
Fonte: O autor

Gráfico 9 - ERP e seu DP para limiares no sistema WinRhizo em medições de raízes



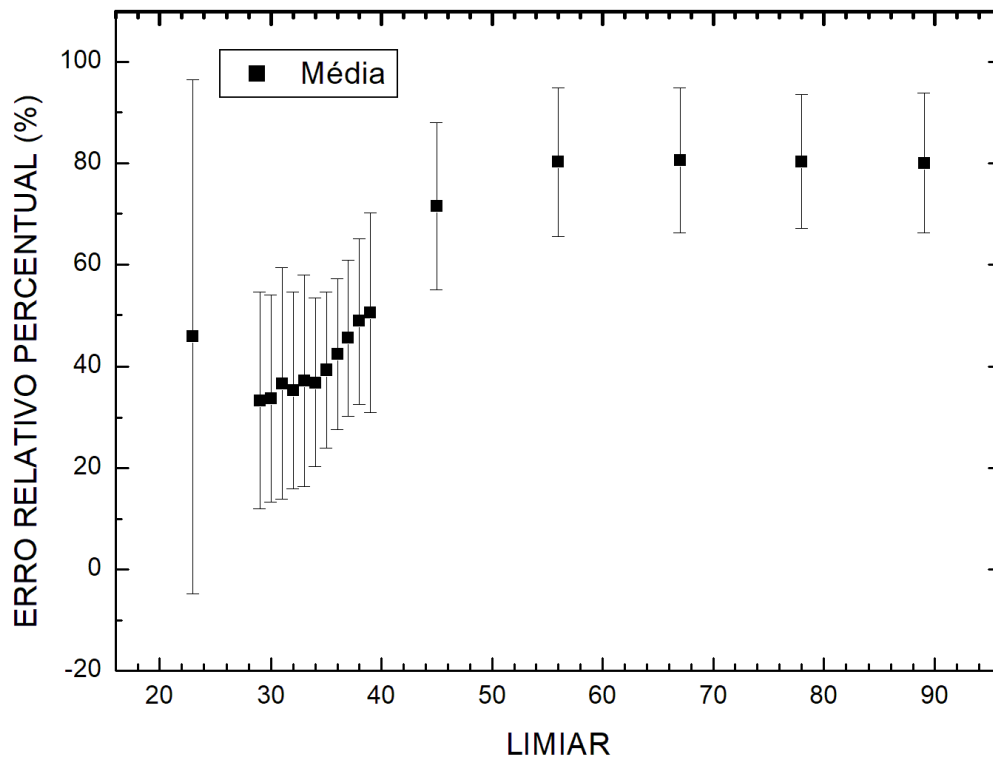
Fonte: O autor

Gráfico 10 - ERP e seu DP para limiares no sistema TMM em medições de raízes



Fonte: O autor

Gráfico 11 - ERP e seu DP para limiares no sistema RoMe em medições de raízes



Fonte: O autor

Para o sistema RoMe - Quadro 20, um dos coeficientes de determinação mais próximo de 1, ao se avaliar em conjunto erros percentuais médios abaixo de 35%, foi 0,851, para o limiar 33. Desse modo, para esse sistema, ao considerar os desvios padrões próximos a 20% e erros percentuais médios abaixo de 35%, para medição de raízes de milho, a faixa de limiares adequados está entre 29 e 30.

É interessante observar a diferença nos resultados dos softwares quando as amostras foram fios de náilon e quando as amostras foram raízes.

Em medidas com fios de náilon, foi possível determinar faixa de valores de limiares adequados para os sistemas WinRhizo e TMM a partir de coeficientes de determinação acima de 0,99, com erro percentual médio menor que 9%, e desvio padrão entre 3% e 12%. Já para o sistema RoMe, não foi possível usar o coeficiente de determinação para auxiliar na determinação da faixa de limiar adequado, sendo então esta limitada aos parâmetros erro percentual médio (próximos a 70%) e desvio padrão (em torno de 23%).

Nota-se que os sistemas WinRhizo e TMM tiveram os coeficientes de determinação maiores para amostras de fios de náilon em relação às raízes. Uma

possível razão para isso é o fato das amostras de fios de náilon possuírem valores de comprimento medidos por trena exatos para serem comparados com os resultados dos softwares (MARUYAMA, 2016). Já para as raízes, utilizaram-se as medidas de comprimento obtidas a partir do método de Tennant, que é um método que indica estimativa de valores. No trabalho de Maruyama (2016), aplicando-se este método para medir comprimentos conhecidos, foram encontrados erros relativos de 16%.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

De acordo com o referencial teórico levantado, verificou-se que mesmo com avanços no processamento digital de imagens, a mensuração de raízes ainda é uma tarefa difícil do ponto de vista computacional. Isso se deve principalmente a identificação do fundo e separação deste com relação ao objeto alvo, a partir do qual os sistemas operam sobre os pixels que de fato são raízes, não as confundindo com sombras ou outros ruídos da imagem.

Obviamente, o cuidado na aquisição das imagens das amostras a serem medidas contribui para minimizar os efeitos de sombras ou sobreposições, e ajudam os sistemas a alcançarem um melhor desempenho. Outra tarefa que cabe ao usuário, em sistemas com segmentação manual, é definir alguns parâmetros para que as raízes sejam identificadas e separadas do fundo corretamente, para então definir um método para chegar ao valor de limiar.

Este trabalho avaliou a sensibilidade de variação de limiar do sistema comercial WinRhizo e dos sistemas livres RoMe e TMM para mensuração de objetos com comprimento conhecidos de fios de náilon e raízes de milho lavadas. Para isso, foi elaborada uma metodologia de avaliação, que consistia em como obter o valor adequado do limiar e como avaliar a mudança do erro percentual médio em função da sua variação para os sistemas a serem avaliados.

Os resultados identificaram os valores de limiares 23, 21 e 25 para os sistemas WinRhizo, RoMe e TMM, respectivamente, como limiares que apresentaram menor erro relativo percentual médio na mensuração de comprimento das amostras de fios de náilon, com aproximadamente 4%, nos sistemas WinRhizo e TMM.

Foi verificado que as imagens das amostras 31 a 34 de fios de náilon se comportaram de maneira diferente frente às demais, pois os histogramas destas tem comportamento diferente das demais. Para elas, os limiares que apresentaram menores erros relativos percentuais médios foi o 34 para os sistemas WinRhizo e RoMe, e o 45 no sistema TMM.

Os limiares utilizados nas amostras de fios de náilon não obtiveram desempenho semelhante para as imagens de raízes em nenhum dos três sistemas utilizados. Os erros percentuais excediam 30%, e por este motivo, também foi realizada a metodologia de variação dos limiares para as imagens de raízes.

Assim, os limiares com menor erro percentual médio encontrados para as imagens das amostras de raízes, a fim de medir seu comprimento, foram 42, 29 e 43 nos sistemas WinRhizo, RoMe e TMM, com erros de 13,28%, 32,91% e 17,7% respectivamente. Diferentemente das imagens de fios de náilon, nesta fase todas as imagens das amostras tiveram comportamento para as técnicas aplicadas do PDI semelhante, sem interferir drasticamente de forma isolada nos resultados finais.

Com relação à sensibilidade, os sistemas TMM e WinRhizo apresentaram comportamento similar nas medidas de fios de náilon e raízes, tendendo a resultar em erros acima de 20% quando oscila-se mais do que 4 unidades do melhor limiar.

O sistema RoMe, mesmo que não tenha apresentado bom desempenho em relação aos comparados neste trabalho, apresentou menor sensibilidade na variação dos limiares, tendendo a um comportamento linear em relação ao erro percentual médio.

Analisando o erro percentual médio em conjunto com seu desvio padrão nos três sistemas, foi possível perceber que os valores de erro eram sobrepostos em limiares diferentes, e por este motivo, estatisticamente, não seria coerente definir apenas um único limiar como adequado, mas sim, um intervalo. Para auxiliar a compor esse intervalo, optou-se em avaliar o coeficiente de determinação entre os valores de comprimento das amostras e os valores estimados em cada limiar.

Para medição de fios de náilon, com desvio padrão abaixo de 11%, erro relativo percentual médio abaixo de 10%, e coeficiente de determinação acima de 0,99, a faixa de 25 ao 45 foi definida como adequada para os sistemas WinRhizo e, para o TMM, foi entre 25 e 29. Para o sistema RoMe, a faixa de limiares adequados foi aquela com $\overline{\text{ERPs}}$ % próximos a 70% e desvio padrão em torno de 23%, ou seja, entre 23 e 29.

Para medição de raízes, com desvio padrão abaixo de 15%, erro relativo percentual médio abaixo de 20%, e coeficiente de determinação variando entre 0,933 a 0,965, a faixa de limiar entre 34 e 44 foi definida como adequada para o sistema WinRhizo. Para o TMM, mantendo o mesmo desvio padrão e erro relativo médio anteriores, mas com coeficientes de determinação estão 0,943 e 0,967, os valores adequados de limiares são 25, 34, e 41 a 43. Para o sistema RoMe, a faixa de limiares adequados elencada foi a com $\overline{\text{ERPs}}$ % até 35%: 29 a 30, com desvio padrão próximo de 20% e coeficiente de determinação por volta de 0,82.

Por fim, o sistema que obteve menor erro percentual para raízes de milho, para medidas de comprimento, foi o WinRhizo, com 13,28%. No entanto, o sistema livre TMM também é uma boa opção para mensuração de comprimento, visto que seu erro percentual médio de 17,7 % fica dentro das expectativas de acurácia em relação ao WinRhizo.

6.1 TRABALHOS FUTUROS

Como trabalhos futuros a pesquisa sugere-se:

- Aplicar a metodologia utilizada em imagens adquiridas com o scanner do software WinRhizo para verificar se o mesmo possui um desempenho diferente ao ser usado em conjunto.
- Comparação da variação de limiar para mensuração de diâmetro para objetos de tamanho conhecidos nos sistemas WinRhizo, RoMe e TMM;
- Comparação da variação de limiar para mensuração de diâmetro para raízes de milho nos sistemas WinRhizo, RoMe e TMM;
- Avaliação dos histogramas das imagens usadas neste trabalho e comparação com os valores de limiar usados nos sistemas;
- Implementação de métodos computacionais de processamento de imagem para ter a rotina de limiar automático nos sistemas livres de mensuração radicular;
- Avaliação do comportamento dos sistemas com imagens geradas pelo escâner calibrado para o sistema WinRhizo.

REFERÊNCIAS

- ARSENAULT, J. L.; POULCUR, S.; MESSIER, C.; GUAY, R. WinRhizoTM, a Root-measuring System with a Unique Overlap Correction Method. **HortScience**, Alexandria, v. 30, n. 4, p. 906, jul. 1995.
- BAUHUS, J.; MESSIER, C. Evaluation of Fine Root Length and Diameter Measurements Obtained Using RHIZO Image Analysis. **Agronomy Journal**, v. 91, n. 1, p. 142-147, jan. 1999.
- BÖHM, W. **Methods of Studying Root Systems**. Berlim: Springer, 1979. 188p.
- BORIANNE, P. SUBSOL, G. FALLAVIER, F. DARDOU, A. AUDEBERT, A. GT-RootS: An integrated software for automated root system measurement from high-throughput phenotyping platform images. **Computers and Electronics in Agriculture**. v.150, p.328-342, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0168169916311437>. Acesso em: 05 jul. 2020.
- BUCZKO, U.; KUCHENBUCH, R. O.; GERKE, H. H. Evaluation of a Core Sampling Scheme to Characterize Root Length Density of Maize. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 316, n. 1-2, p. 205-215, 2009.
- CAIRES, E. F.; BARTH, G.; GARBUJO, F. J.; KUSMAN, M. T. Correção da Acidez do Solo, Crescimento Radicular e Nutrição do Milho de Acordo com a Calagem na Superfície em Sistema Plantio Direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, n. 4, p. 1011-1022, dez. 2002.
- CAIRES, E. F.; FONSECA, A. F.; FELDHAUS, I. C.; BLUM, J. Crescimento Radicular e Nutrição da Soja Cultivada no Sistema Plantio Direto em Resposta ao Calcário e Gesso na Superfície. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, n. 4, p. 1029-1040, dez. 2001.
- CORREA, S. M. B. B. **Probabilidade e Estatística**. 2. ed. Belo Horizonte: Pontifícia Universidade Católica Minas Virtual, 2003. 116 p.
- CRESTANA, S.; GUIMARÃES, M. F.; JORGE, L. A. C.; RALISCH, R.; TOZZI, C. L.; TORRE-NETO, A.; VAZ, C. M. P. Avaliação da distribuição de raízes no solo auxiliada por processamento de imagens digitais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 18, p. 365-371, 1994.
- DELBEM, I. D. **Processamento e Análise Digital de Imagens Aplicados aos Estudos de Liberação Mineral**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.
- FLAVEL R. J. et al. An image processing and analysis tool for identifying and analysing complex plant root systems in 3D soil using non-destructive analysis: Root1. **PLoS ONE**, San Francisco, v.12, n.5, mai. 2017. Disponível em: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0176433>. Acesso em: 05 jul. 2020.

GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. E. **Processamento de Imagens Digitais**. São Paulo: Edgard Blücher, 2000.

GONZÁLEZ A. *et al.* MyROOT 2.0: An automatic tool for high throughput and accurate primary root length measurement. **Computers and Electronics in Agriculture**. v.168. jan. 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016816991931155X>. Acesso em 05 jul. 2020.

IMADA, R. N. **Reconhecimento de contorno de edifício em imagens de alta resolução usando os momentos complexos de Zernike**. 2014. Dissertação (Mestrado em Matemática Aplicada e Computacional) - Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2014.

JAIN, K.; MURTY, N.; FLYNN, J. Data Clustering: A Review. **ACM computing surveys**, New York, v. 31, n. 3, p. 223-323, set. 1999.

JIN, K.; SHEN, J.; ASHTON, R. W.; DODD, I. C.; PARRY, M. A. J.; WHALLEY, W. R. How Do Roots Elongate in a Structured Soil. **Journal of Experimental Botany**, Lancaster, v. 64, n. 15, p. 4761-4777, nov. 2013.

JORGE, L. A. C.; RODRIGUES, A. F. O. Safira: sistema de análise de fibras e raízes. **Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento da Embrapa Instrumentação Agropecuária**. São Carlos: Embrapa Instrumentação Agropecuária, 2008. 21 p.

KAPUR, J.; SAHOO, P.; WONG, A. A New Method for Gray-Level Picture Thresholding Using the Entropy of the Histogram, **Computer Vision, Graphics and Image Processing**, v. 29, n. 3, p. 273-285, mar. 1985.

KASPAR, T. C.; EWING, R. P. ROOTEDGE: Software for Measuring Root Length from Desktop Scanner Images. **Agronomy Journal**, v. 89, n. 6, p. 932-940, nov. 1997.

KIMURA, K.; KIKUCHI, S.; YAMASAKI, S. Accurate Root Length Measurement by Image Analysis. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 216, n. 1-2, p. 117-127, nov. 1999.

KIMURA, K.; YAMASAKI, S. Root Length and Diameter Measurement Using NIH Image: Application of the Line-Intercept Principle for Diameter Estimation. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 234, p. 37-46, jul. 2001.

KIRCHHOF, G. Measurement of Root Length and Thickness Using a Hand-Held Computer Scanner. **Field Crops Research**, v. 29, n. 1, p. 79-88, mar. 1992.

KIRCHHOF, G.; PENDAR, K. **Delta-T SCAN User Manual**. Cambridge: Delta-T Scan Devices Ltd, 1993, 244 p.

KWON, J. Improved Parallel Thinning Algorithm to Obtain Unit-Width Skeleton. **The International Journal of Multimedia & Its Applications**, v. 5, n. 2, p. 1-14, 2013.

KWON, J.; GI, J.; KANG, E. An enhanced thinning algorithm using parallel processing. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON IMAGE PROCESSING, 3., 2001. **Anais [...]**,Thessaloniki: IEEE, 2001 p. 752-755.

LEBOWITZ, R. J. Digital Image Analysis Measurement of Root Length and Diameter. **Environmental and Experimental Botany**, Mankato, v. 28, n. 3, p. 267-273, jul. 1988.

LOBET G. *et al.*; Using a Structural Root System Model to Evaluate and Improve the Accuracy of Root Image Analysis Pipelines. **Frontiers in Plant Science**, Lausana, v.8, abr. 2017. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2017.00447/full>. Acesso em: 05 jul. 2020.

MAGALHÃES, P. C.; DURÃES, F. O. M. **Fisiologia da Produção de Milho**. Sete Lagoas: EMBRAPA-CNPMS, 2006. Circular Técnica n. 76, 10 p. ISSN 1679-1150.

MARQUES FILHO, O.; VIEIRA NETO, H. **Processamento Digital de Imagens**. Rio de Janeiro: Brasport, 1999. ISBN 8574520098.

MARSH, B. a'B. Measurement of Length in Random Arrangements of Lines. **Journal of Applied Ecology**, v. 8, n. 1, p. 265-267, 1971.

MARUYAMA, T. M. **Avaliação de Comprimento e Diâmetro Radicular do Milho por Técnicas de Processamento Digital de Imagens**. 2016. Dissertação (Mestrado em Computação Aplicada). Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2016.

MURAKAMI, T.; YONEYAMA, T. Comparison of Root Length of Two Rice (*Oryza sativa* L.) Varieties by Using an Image Analyzer. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 105, n. 2, p. 287-289, set. 1988.

NAME, M. H. **Método Computacional para Avaliação do Crescimento Radicular da Cultura da Soja**. 2013. Dissertação (Mestrado em Computação Aplicada). Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2013.

NARISSETTI N. *et al.* Semi-automated Root Image Analysis (saRIA). **Scientific Reports**. Londres, v.9, n.1, dez. 2019. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/338118961_Semi-automated_Root_Image_Analysis_saRIA. Acesso em: 05 jul. 2020.

NEWMAN, E. I. A Method of Estimating the Total Length of Root in a Sample. **Journal of Applied Ecology**, v. 3, n. 1, p. 139-145, mai. 1966.

NINOMIYA, K.; TSUSHIMA, Y.; KINO-OKA, M.; TAYA, M. An Automatic Image Analyzing System for Evaluation of Elongating Behavior of Plant Hairy Roots Exposed to Herbicidal Stimuli. **Journal of Bioscience and Bioengineering**, v. 96, n. 1, p. 98-101, 2003.

NOWAKOWSKI K. *et al.* Measurement of the Development Degree of the Selected Crop Root System Based on the Computer Image Analysis. **Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering**, v. 61, n. 4, p. 77-83, 2016.

OLIVEIRA, G. M. de. Desenvolvimento de métodos supervisionados e não supervisionados para segmentação de imagens de raízes lavadas. *In*: ENCONTRO ANUAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 26., 2017, Ponta Grossa, **Anais [...]**. Ponta Grossa: UEPG, 2017.

PIERRET, A.; GONKHAMDEE, S.; JOURDAN, C.; MAEGHT, J. IJ_Rhizo: an open-source software to measure scanned images of root samples. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 373, n. 1-2, p. 531–539, jul. 2013.

RICHARDS, F.; GOUBRAN, F. H.; GARWOLI, W. N.; DALY, M. W. A Machine for Determining Root Length. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 52, n. 1, p. 69-76, jun. 1979.

REAGRO. **É possível encontrar raízes de milho até qual profundidade?** Blog REAGRO. Belo Horizonte, 30 jul. 2018. Disponível em: <https://rehagro.com.br/blog/raizes-de-milho-ate-qual-profundidade/>. Acesso em: 10 out. 2020.

ROWSE, H. R.; PHILLIPS, D. A. An Instrument for Estimating the Total Length of of Root in a Sample. **Journal of Applied Ecology**, v. 11, n. 1, p. 309-314, 1974.

SCHENK, M. K.; BARBER, S. A. Root Characteristics of Corn Genotypes as Related to P Uptake. **Agronomy Journal**, v. 71, n. 6, p. 921-924, nov. 1979.

SILVA, M. A. de A. e. **Desenvolvimento Radicular das Culturas de Feijão, Soja e Milho, Sob Diferentes Manejos de Solo, Irrigadas por Pivô Central**. 2007, 140 f. Tese(Doutorado em Agronomia). Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Botucatu, 2007.

SMIT, A. L.; BENGOUGH, A. G.; ENGELS, C.; VAN NOORDWIJK, M.; PELLERIN, S.; VAN DE GEIJIN, S. C. **Root Methods: A Handbook**. Berlim: Springer-Verlag, 2000.

SMIT, A. L.; SPRANGERS, J. F. C. M.; SABLİK, P. W.; GROENWOLD, J. Automated Measurement of Root Length with a Three-dimensional High-Resolution Scanner and Image Analysis. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 158, n. 1, p. 145-149, jan. 1994.

TANAKA, S.; YAMAUCHI, A.; KONO, Y. Easily Accessible Method for Root Length Measurement Using an Image Analysis System. **Japanese Journal of Crop Science**, Tokyo, v. 64, n. 1, p. 144-147, mar. 1995.

TENNANT, D. A Test of a Modified Line Intersect Method of Estimating Root Length. **Journal of Ecology**, London, v. 63, n. 3, p. 995-1001, nov. 1975.

TISSI, J. A. **Crescimento Radicular e Nutrição de Milho (*Zea mays* L.) Cultivado em Sistema de Plantio Direto em Função da Aplicação Superficial de Calcário em Latossolo Argiloso**. 2001. Dissertação (Mestrado em Agronomia). Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2001.

URRESTARAZU M. *et al.* Algorithm implementation in MATLAB for root measurement. **Computers and Electronics in Agriculture**.v.174, jul. 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S016816991932023X>. Acesso em: 05 jul. 2020.

WANG, T. *et al.* SegRoot: A high throughput segmentation method for root image analysis. **Computers and Electronics in Agriculture**. v. 162, jul. 2019. p.845-854. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0168169919303874>. Acesso em: 05 jul. 2020.

WASSON, A. P.; RICHARDS, R. A.; CHATRATH, R.; MISRA, S. C.; PRASAD, S. V. S.; REBETZKE, G. J.; KIRKEGAARD, J. A.; CHRISTOPHER, J.; WATT, M. Traits and Selection Strategies to Improve Root Systems and Water Uptake in Water-Limited Wheat Crops. **Journal of Experimental Botany**, Lancaster, v. 63, n. 9, p. 3485-3498, mai. 2012.

ZHANG, T. Y.; SUEN, C. Y. A Fast Parallel Algorithm for Thinning Digital Patterns. **Communications of the ACM**, v. 27, n. 3, p. 236-239, mar. 1984.

ZOON, F. C.; TIENDEREN, P. H. A Rapid Quantitative Measurement of Root Length and Root Branching by Microcomputer Image Analysis. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 126, n. 2, p. 301-308, ago. 1990.

APÊNDICE A – MEDIDAS DE FIOS DE NAILON NO SISTEMA WINRHIZO

Os resultados das medidas no sistema WinRhizo para fios de náilon estão nos Quadros 21 e 22, que correspondem à primeira e segunda fase, respectivamente, descritas na metodologia, Seção 4.2.1. Os erros da linha identificada como (1) desconsideram as amostras 31 a 34 para o cálculo, e os erros na linha identificada como (2) consideram estas amostras para o resultado.

Os limiares com erros percentuais médios que resultaram acima de 90% os anteriores ou posteriores, com resultado crescente a este valor não foram inclusos.

Importante frisar que este apêndice possui as medidas de todas as amostras, no entanto, na seção de resultados, as amostras 31 a 34 foram tratadas separadamente visto que apresentaram erros que extrapolavam 100% e interferiam no desempenho médio dos limiares considerados adequados para o restante amostral.

Quadro 21 - Resultados da primeira fase de medições de fios de náilon no sistema WinRhizo

(continua)

Amostra		1		12		23		34		45		56		67	
Nº	C (mm)	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%
1	1000	105,13	89,49	0,00	100,00	1051,28	5,13	872,50	12,75	681,86	31,81	492,99	50,70	250,40	74,96
2	2000	210,90	89,45	517,55	74,12	2109,04	5,45	1745,99	12,70	1494,45	25,28	1059,87	47,01	512,37	74,38
3	3000	294,34	90,19	6681,95	122,73	2943,36	1,89	2377,03	20,77	1902,83	36,57	1383,92	53,87	593,79	80,21
4	4000	386,48	90,34	8157,42	103,94	3864,85	3,38	3487,57	12,81	3041,63	23,96	2344,65	41,38	1057,78	73,56
5	5000	473,74	90,53	147,22	97,06	4737,38	5,25	3819,51	23,61	2941,68	41,17	2048,51	59,03	1053,90	78,92
6	6000	580,25	90,33	13376,88	122,95	5802,50	3,29	4347,43	27,54	3095,59	48,41	1964,59	67,26	665,91	88,90
7	7000	735,59	89,49	5949,49	15,01	7355,89	5,08	5987,97	14,46	5238,97	25,16	3996,17	42,91	2063,32	70,52
8	8000	924,70	88,44	2018,32	74,77	9246,99	15,59	7176,52	10,29	6251,13	21,86	5387,96	32,65	4071,95	49,10
9	9000	892,91	90,08	3769,40	58,12	8929,14	0,79	7490,07	16,78	5936,34	34,04	4848,02	46,13	3405,62	62,16
10	10000	960,11	90,40	0,00	100,00	9601,09	3,99	8667,84	13,32	7930,83	20,69	6379,05	36,21	3677,75	63,22
11	11000	1061,43	90,35	0,00	100,00	10614,28	3,51	9566,32	13,03	8490,42	22,81	7254,31	34,05	4743,74	56,88
12	12000	1176,84	90,19	5341,77	55,49	11768,37	1,93	10700,73	10,83	9651,72	19,57	8167,52	31,94	4722,52	60,65
13	13000	1299,26	90,01	3861,91	70,29	12992,58	0,06	11802,12	9,21	10213,66	21,43	8706,31	33,03	5295,37	59,27
14	14000	1377,33	90,16	493,70	96,47	13773,31	1,62	12213,54	12,76	10529,04	24,79	8820,79	36,99	5168,70	63,08
15	15000	1475,56	90,16	3422,54	77,18	14755,57	1,63	13417,39	10,55	11929,77	20,47	9755,76	34,96	6630,86	55,79
16	16000	1523,22	90,48	3082,44	80,73	15232,17	4,80	13259,80	17,13	11326,22	29,21	8374,16	47,66	4099,70	74,38
17	17000	1754,13	89,68	477,54	97,19	17541,26	3,18	14402,18	15,28	12118,99	28,71	8913,75	47,57	4018,40	76,36

Quadro 21 - Resultados da primeira fase de medições de fios de náilon no sistema WinRhizo

(continua)

Amostra		1		12		23		34		45		56		67	
Nº	C (mm)	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%
18	18000	1709,74	90,50	1940,59	89,22	18607,66	3,38	15424,96	14,31	13849,25	23,06	10431,40	42,05	4889,51	72,84
19	19000	1787,80	90,59	0,00	100,00	18655,80	1,81	14995,27	21,08	12320,06	35,16	8605,44	54,71	4364,02	77,03
20	20000	1878,25	90,61	0,00	100,00	19971,35	0,14	17301,16	13,49	15457,18	22,71	11829,37	40,85	5583,61	72,08
21	21000	2086,98	90,06	629,22	97,00	20587,25	1,97	17872,70	14,89	15781,92	24,85	12718,80	39,43	7164,43	65,88
22	22000	2119,45	90,37	0,00	100,00	21001,15	4,54	18438,13	16,19	16273,18	26,03	12690,97	42,31	6856,23	68,84
23	23000	2100,12	90,87	0,00	100,00	34250,27	48,91	19994,03	13,07	17707,50	23,01	15012,47	34,73	9178,72	60,09
24	24000	3425,03	85,73	0,00	100,00	23188,73	3,38	20698,85	13,75	18477,80	23,01	14745,92	38,56	8526,53	64,47
25	25000	2318,87	90,72	839,70	96,64	24376,50	2,49	21880,27	12,48	19529,53	21,88	15393,84	38,42	7886,30	68,45
26	26000	2437,65	90,62	0,00	100,00	25327,72	2,59	22151,82	14,80	20129,96	22,58	16014,43	38,41	9148,12	64,81
27	27000	2532,77	90,62	785,55	97,09	25155,74	6,83	22325,08	17,31	19368,04	28,27	14412,76	46,62	7758,27	71,27
28	28000	2515,57	91,02	0,00	100,00	27314,77	2,45	25221,04	9,92	23055,20	17,66	17922,66	35,99	9615,98	65,66
29	29000	2731,48	90,58	0,00	100,00	26893,96	7,26	24073,75	16,99	21577,10	25,60	17472,67	39,75	8929,69	69,21
30	30000	2689,40	91,04	0,00	100,00	28809,51	3,97	25520,68	14,93	22999,67	23,33	7644,63	74,52	9513,07	68,29
31*	1000	2114,07	111,41	296,07	70,39	21140,71	2014,07	1033,95	3,40	987,36	1,26	864,01	13,60	476,57	52,34
32*	2000	2926,68	46,33	296,07	85,20	29266,84	1363,34	2048,99	2,45	1978,61	1,07	1787,23	10,64	1352,06	32,40
33*	3000	2485,65	17,14	296,07	90,13	24856,55	728,55	2959,89	1,34	2901,33	3,29	2678,12	10,73	2133,14	28,90
34*	4000	2723,54	31,91	296,07	92,60	27235,41	580,89	4003,86	0,10	3855,77	3,61	3291,43	17,71	1938,31	51,54

Quadro 21- Resultados da primeira fase de medições de fios de náilon no sistema WinRhizo

(conclusão)

Amostra		1		12		23		34		45		56		67	
Nº	C (mm)	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%
36	2000	204,05	89,80	7094,42	254,72	2040,53	2,03	1517,86	24,11	1157,12	42,14	685,60	65,72	196,74	90,16
37	3000	301,02	89,97	1485,52	50,48	3010,15	0,34	2291,20	23,63	1708,72	43,04	971,57	67,61	350,88	88,30
38	4000	402,80	89,93	6784,84	69,62	4028,01	0,70	3087,51	22,81	2358,48	41,04	1582,91	60,43	620,44	84,49
39	1000	104,55	89,54	0,00	100,00	1045,52	4,55	1237,14	23,71	1669,51	66,95	1290,03	29,00	1036,19	3,62
40	2000	197,56	90,12	3191,84	59,59	1975,64	1,22	1523,43	23,83	1178,78	41,06	677,63	66,12	98,32	95,08
41	2000	202,14	89,89	4344,94	117,25	2021,42	1,07	1853,41	7,33	1361,85	31,91	975,45	51,23	314,19	84,29
42	2000	213,04	89,35	6961,22	248,06	2130,44	6,52	2179,10	8,96	1234,05	38,30	606,29	69,69	345,22	82,74
43	2000	206,63	89,67	9916,73	395,84	2066,32	3,32	1742,72	12,86	1267,24	36,64	924,20	53,79	473,13	76,34
44	2000	211,33	89,43	0,00	100,00	2113,30	5,66	2071,99	3,60	1119,77	44,01	698,33	65,08	419,01	79,05
45	2000	285,44	85,73	0,00	100,00	2854,44	42,72	2366,38	18,32	2028,30	1,42	1602,67	19,87	1291,05	35,45
46	3000	298,70	90,04	333,42	88,89	2987,05	0,43	2284,12	23,86	1389,87	53,67	699,38	76,69	239,37	92,02
47	3000	328,68	89,04	0,00	100,00	3286,81	9,56	3297,73	9,92	1943,51	35,22	1201,94	59,94	607,17	79,76
48	3000	306,13	89,80	3590,23	19,67	3061,31	2,04	3271,28	9,04	3242,19	8,07	2604,49	13,18	1534,00	48,87
49	3000	308,52	89,72	2756,99	8,10	3085,21	2,84	3255,15	8,51	2195,64	26,81	1310,77	56,31	629,08	79,03
50	4000	406,49	89,84	0,00	100,00	4064,90	1,62	4096,57	2,41	2555,37	36,12	1469,12	63,27	816,24	79,59
		¹ ERP	89,79	ERP	100,83	ERP	6,21	ERP	14,84	ERP	29,67	ERP	47,20	ERP	70,06
		² ERP	83,17	ERP	95,53	ERP	99,45	ERP	13,29	ERP	26,21	ERP	42,45	ERP	64,76

Fonte: O autor

Quadro 22- Resultados da segunda fase de medições de fios de náilon no sistema WinRhizo

(continua)

Amostra		17		19		21		25		27		29	
Nº	C (mm)	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%
1	1000	21535,42	2053,54	4599,64	359,96	1615,45	61,55	1015,90	1,59	1012,79	1,28	992,94	0,71
2	2000	15433,72	671,69	13531,41	576,57	3304,56	65,23	1982,29	0,89	1950,04	2,50	1902,15	4,89
3	3000	4137,60	37,92	3012,01	0,40	2984,77	0,51	2830,90	5,64	2688,78	10,37	2564,10	14,53
4	4000	4489,94	12,25	3951,81	1,20	3912,38	2,19	3781,20	5,47	3722,46	6,94	3639,52	9,01
5	5000	44736,04	794,72	23822,40	376,45	7336,17	46,72	4588,46	8,23	4428,00	11,44	4181,23	16,38
6	6000	21386,90	256,45	6586,17	9,77	5864,32	2,26	5595,10	6,75	5328,11	11,20	5007,86	16,54
7	7000	22106,90	215,81	24319,15	247,42	9797,20	39,96	6921,84	1,12	6698,45	4,31	6500,54	7,14
8	8000	44717,77	458,97	41198,81	414,99	19616,87	145,21	8086,68	1,08	7927,56	0,91	7790,60	2,62
9	9000	39350,96	337,23	14998,78	66,65	9490,86	5,45	8825,73	1,94	8682,67	3,53	8467,13	5,92
10	10000	46909,21	369,09	31620,29	216,20	11865,85	18,66	9391,97	6,08	9232,27	7,68	9043,96	9,56
11	11000	51922,71	372,02	24833,95	125,76	11587,91	5,34	10461,37	4,90	10379,49	5,64	10214,29	7,14
12	12000	45809,03	281,74	25021,19	108,51	13020,24	8,50	11644,45	2,96	11492,84	4,23	11265,40	6,12
13	13000	54792,57	321,48	25967,59	99,75	14665,84	12,81	12892,24	0,83	12817,75	1,40	12638,76	2,78
14	14000	40374,73	188,39	15884,65	13,46	13866,86	0,95	13700,99	2,14	13548,85	3,22	13294,38	5,04
15	15000	33127,01	120,85	19813,83	32,09	15380,05	2,53	14480,94	3,46	14266,89	4,89	14051,46	6,32
16	16000	45387,62	183,67	18494,09	15,59	15544,87	2,84	15004,47	6,22	14586,82	8,83	14151,43	11,55
17	17000	28655,99	68,56	50185,29	195,21	27028,53	58,99	16682,54	1,87	16391,46	3,58	15904,31	6,45
18	18000	52454,25	191,41	57678,93	220,44	29485,11	63,81	17535,79	2,58	16954,27	5,81	16394,84	8,92

Quadro 22- Resultados da segunda fase de medições de fios de náilon no sistema WinRhizo

(continua)

Amostra		17		19		21		25		27		29	
Nº	C (mm)	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%
19	19000	43982,53	131,49	31628,71	66,47	19333,99	1,76	17991,84	5,31	17165,26	9,66	16384,08	13,77
20	20000	50996,77	154,98	50920,10	154,60	25653,52	28,27	19371,13	3,14	18905,65	5,47	18362,65	8,19
21	21000	80476,39	283,22	33187,35	58,03	20843,30	0,75	20325,73	3,21	19790,75	5,76	19179,58	8,67
22	22000	55588,54	152,68	29864,60	35,75	21275,97	3,29	20795,62	5,47	20388,92	7,32	19827,61	9,87
23	23000	22826,09	0,76	51799,79	125,22	49710,25	116,13	23779,53	3,39	21730,45	5,52	21250,36	7,61
24	24000	43336,53	80,57	44905,75	87,11	26054,22	8,56	23055,19	3,94	22810,15	4,96	22187,58	7,55
25	25000	54338,25	117,35	27958,61	11,83	24634,81	1,46	24149,78	3,40	23652,92	5,39	23096,82	7,61
26	26000	40108,18	54,26	37594,14	44,59	31253,17	20,20	24721,33	4,92	24107,32	7,28	23404,87	9,98
27	27000	39317,09	45,62	28511,64	5,60	25428,87	5,82	25059,26	7,19	24715,23	8,46	24011,20	11,07
28	28000	60359,64	115,57	33496,07	19,63	27808,86	0,68	27199,45	2,86	26961,72	3,71	26474,23	5,45
29	29000	60258,41	107,79	37841,78	30,49	27345,27	5,71	26718,04	7,87	26227,24	9,56	25588,64	11,76
30	30000	43151,02	43,84	44185,87	47,29	30098,63	0,33	28519,56	4,93	27925,25	6,92	27162,83	9,46
31*	1000	296,07	70,39	0,00	100,00	13608,21	1260,82	14434,65	1343,47	2402,41	140,24	1322,16	32,22
32*	2000	296,07	85,20	377,29	81,14	11868,10	493,41	13236,23	561,81	3030,61	51,53	2218,46	10,92
33*	3000	296,07	90,13	679,64	77,35	0,00	100,00	5359,21	78,64	3309,80	10,33	3080,00	2,67
34*	4000	296,07	92,60	0,01	100,00	17023,86	325,60	7284,78	82,12	4431,82	10,80	4151,99	3,80
35	1000	16944,99	1594,50	14659,53	1365,95	4130,77	313,08	1039,74	3,97	1013,82	1,38	966,48	3,35
36	2000	15136,05	656,80	2551,77	27,59	2083,83	4,19	1985,18	0,74	1853,64	7,32	1730,59	13,47

Quadro 22 - Resultados da segunda fase de medições de fios de náilon no sistema WinRhizo

(conclusão)

Amostra		17		19		21		25		27		29	
N°	C (mm)	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%
37	3000	18277,53	509,25	5710,56	90,35	3204,88	6,83	2948,66	1,71	2812,70	6,24	2643,42	11,89
38	4000	21465,84	436,65	4950,05	23,75	4083,40	2,09	3964,54	0,89	3804,35	4,89	3562,13	10,95
39	1000	21043,64	2004,36	6817,84	581,78	1232,07	23,21	1023,67	2,37	1015,53	1,55	1043,31	4,33
40	2000	19762,87	888,14	3299,59	64,98	2039,10	1,95	1935,98	3,20	1872,48	6,38	1784,81	10,76
41	2000	21742,31	987,12	3714,15	85,71	2147,18	7,36	2005,95	0,30	1991,10	0,45	1973,23	1,34
42	2000	6337,33	216,87	2552,43	27,62	2067,29	3,36	2394,78	19,74	2568,63	28,43	2637,22	31,86
43	2000	17445,76	772,29	2546,77	27,34	2092,26	4,61	2045,02	2,25	2020,99	1,05	1965,06	1,75
44	2000	23605,87	1080,29	4528,95	126,45	2198,73	9,94	2185,24	9,26	2342,23	17,11	2452,90	22,64
45	2000	11654,88	482,74	15496,47	674,82	12857,58	542,88	2173,93	8,70	2123,37	6,17	2265,34	13,27
46	3000	20937,66	597,92	9079,52	202,65	3174,01	5,80	2959,74	1,34	2908,58	3,05	2759,87	8,00
47	3000	19433,88	547,80	21236,94	607,90	5965,06	98,84	3068,33	2,28	3100,46	3,35	3291,26	9,71
48	3000	16663,97	455,47	4048,16	34,94	3121,92	4,06	3042,22	1,41	3062,66	2,09	3167,84	5,59
49	3000	18067,65	502,25	4744,21	58,14	3256,44	8,55	3158,35	5,28	3327,63	10,92	3431,78	14,39
50	4000	31410,57	685,26	6488,00	62,20	4180,62	4,52	4038,59	0,96	4176,05	4,40	4300,42	7,51
		¹ ERP	448,73	ERP	170,20	ERP	38,65	ERP	3,99	ERP	6,14	ERP	9,20
		² ERP	419,60	ERP	163,75	ERP	79,15	ERP	45,00	ERP	9,91	ERP	9,46

Fonte: O autor

APÊNDICE B – MEDIDAS DE FIOS DE NAILON NO SISTEMA ROME

Os resultados das medidas no sistema RoMe para fios de náilon estão nos Quadros 23 e 24, que correspondem à primeira e segunda fase, respectivamente, descritas na metodologia, Seção 4.2.1. Os erros da linha identificada como (1) desconsideram as amostras 31 a 34 para o cálculo, e os erros na linha identificada como (2) consideram estas amostras para o resultado.

Os limiares com erros percentuais médios que resultaram acima de 90% os anteriores ou posteriores, com resultado crescente a este valor não foram inclusos.

Importante frisar que este apêndice possui as medidas de todas as amostras, no entanto, na seção de resultados, as amostras 31 a 34 foram tratadas separadamente visto que apresentaram erros que extrapolavam 100% e interferiam no desempenho médio dos limiares considerados adequados para o restante amostral.

Quadro 23- Resultados da primeira fase de medições de fios de náilon no sistema RoMe

(continua)

Amostra		12		23		34		45		56		67		78	
Nº	C (mm)	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%
1	1000	0,00	100,00	1086,98	8,70	809,84	19,02	675,78	32,42	639,26	36,07	618,3265	38,17	618,91	38,11
2	2000	0,00	100,00	1046,47	47,68	797,93	60,10	747,09	62,65	726,86	63,66	712,491	64,38	618,91	69,05
3	3000	6486,81	116,23	929,65	69,01	871,63	70,95	780,49	73,98	651,99	78,27	608,7553	79,71	585,02	80,50
4	4000	7432,85	85,82	907,45	77,31	818,62	79,53	788,52	80,29	729,23	81,77	554,7664	86,13	537,66	86,56
5	5000	98,68	98,03	2058,99	58,82	1651,71	66,97	1457,70	70,85	1426,48	71,47	1398,27	72,03	1380,41	72,39
6	6000	3262,50	45,62	1799,48	70,01	1504,57	74,92	1466,15	75,56	1413,69	76,44	1409,22	76,51	1372,08	77,13
7	7000	4370,15	37,57	2073,35	70,38	1647,87	76,46	1503,53	78,52	1465,43	79,07	1447,67	79,32	1436,03	79,49
8	8000	1077,10	86,54	1900,93	76,24	1609,92	79,88	1512,57	81,09	1450,46	81,87	1430,30	82,12	1426,80	82,16
9	9000	843,76	90,62	1894,82	78,95	1624,65	81,95	1536,45	82,93	1501,04	83,32	1510,74	83,21	1428,42	84,13
10	10000	83,79	99,16	2024,54	79,75	1652,33	83,48	1552,01	84,48	1461,07	85,39	1441,59	85,58	1383,21	86,17
11	11000	511,98	95,35	1946,24	82,31	1583,00	85,61	1529,89	86,09	1517,44	86,21	1496,43	86,40	1475,12	86,59
12	12000	1445,96	87,95	1897,58	84,19	1648,64	86,26	1550,19	87,08	1459,04	87,84	1474,44	87,71	1470,76	87,74
13	13000	821,20	93,68	1935,43	85,11	1597,73	87,71	1550,04	88,08	1521,84	88,29	1493,04	88,52	1485,52	88,57
14	14000	224,55	98,40	1833,59	86,90	1670,45	88,07	1539,93	89,00	1516,76	89,17	1504,25	89,26	1506,47	89,24
15	15000	27,09	99,82	1927,73	87,15	1591,63	89,39	1548,24	89,68	1511,26	89,92	1529,53	89,80	1495,72	90,03
16	16000	1661,02	89,62	1833,38	88,54	1590,68	90,06	1553,97	90,29	1554,95	90,28	1560,08	90,25	1522,43	90,48
17	17000	1,79	99,99	2252,24	86,75	1582,78	90,69	1536,32	90,96	1525,47	91,03	1499,19	91,18	1538,33	90,95

Quadro 23 - Resultados da primeira fase de medições de fios de náilon no sistema RoMe

(continua)

Amostra		12		23		34		45		56		67		78	
Nº	C (mm)	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%
18	18000	168,35	99,06	3228,85	82,06	2442,18	86,43	2293,69	87,26	2205,34	87,75	2171,26	87,94	2176,36	87,91
19	19000	336,45	98,23	1846,00	90,28	1578,52	91,69	1572,03	91,73	1584,15	91,66	1549,46	91,84	1574,71	91,71
20	20000	397,08	98,01	2106,59	89,47	1583,06	92,08	1561,00	92,19	1529,98	92,35	1499,18	92,50	1489,68	92,55
21	21000	203,10	99,03	2753,91	86,89	2421,36	88,47	2318,91	88,96	2244,50	89,31	2223,62	89,41	2271,56	89,18
22	22000	47,59	99,78	1778,54	91,92	1566,05	92,88	1557,82	92,92	1530,15	93,04	1534,01	93,03	1540,46	93,00
23	23000	0,00	100,00	9505,79	58,67	1616,93	92,97	1605,62	93,02	1570,94	93,17	1578,47	93,14	1597,31	93,06
24	24000	0,00	100,00	2013,66	91,61	1595,79	93,35	1566,08	93,47	1546,82	93,55	1535,16	93,60	1544,66	93,56
25	25000	5,28	99,98	1721,66	93,11	1579,91	93,68	1564,94	93,74	1562,33	93,75	1582,69	93,67	1604,06	93,58
26	26000	30,36	99,88	2116,04	91,86	1617,07	93,78	1520,13	94,15	1468,45	94,35	1455,49	94,40	1466,60	94,36
27	27000	22,82	99,92	1752,71	93,51	1606,45	94,05	1530,03	94,33	1511,33	94,40	1518,90	94,37	1523,23	94,36
28	28000	0,00	100,00	1848,98	93,40	1635,98	94,16	1580,54	94,36	1552,93	94,45	1542,80	94,49	1580,48	94,36
29	29000	70,26	99,76	1830,52	93,69	1618,12	94,42	1545,44	94,67	1505,84	94,81	1424,61	95,09	1442,39	95,03
30	30000	147,21	99,51	1882,38	93,73	1625,21	94,58	1572,72	94,76	1511,47	94,96	1483,48	95,06	1489,75	95,03
31*	1000	0,00	100,00	5019,63	401,96	948,82	5,12	788,39	21,16	670,63	32,94	621,46	37,85	606,29	39,37
32*	2000	0,00	100,00	7636,03	281,80	944,01	52,80	811,75	59,41	766,34	61,68	769,09	61,55	762,54	61,87
33*	3000	0,00	100,00	11500,13	283,34	925,99	69,13	857,35	71,42	763,96	74,53	714,32	76,19	719,85	76,00
34*	4000	0,00	100,00	13949,94	248,75	850,11	78,75	843,47	78,91	732,97	81,68	731,73	81,71	716,83	82,08

Quadro 23 - Resultados da primeira fase de medições de fios de náilon no sistema RoMe

(conclusão)

Amostra		12		23		34		45		56		67		78	
Nº	C (mm)	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%
35	1000	0,00	100,00	1219,02	21,90	873,88	12,61	746,69	25,33	668,29	33,17	621,94	37,81	616,82	38,32
36	2000	4357,15	117,86	966,62	51,67	859,61	57,02	787,90	60,60	727,29	63,64	681,81	65,91	548,55	72,57
37	3000	1011,15	66,30	947,61	68,41	807,06	73,10	799,10	73,36	764,92	74,50	750,55	74,98	758,36	74,72
38	4000	2901,62	27,46	947,53	76,31	822,78	79,43	783,54	80,41	760,64	80,98	772,46	80,69	791,87	80,20
39	1000	26,56	97,34	949,87	5,01	911,10	8,89	915,65	8,43	715,08	28,49	660,60	33,94	649,28	35,07
40	2000	334,02	83,30	961,31	51,93	767,08	61,65	763,11	61,84	709,80	64,51	683,10	65,84	674,02	66,30
41	2000	750,70	62,46	897,29	55,14	775,75	61,21	739,28	63,04	706,43	64,68	715,00	64,25	674,02	66,30
42	2000	4664,06	133,20	932,34	53,38	984,84	50,76	748,99	62,55	706,55	64,67	692,64	65,37	666,37	66,68
43	2000	3811,00	90,55	896,78	55,16	825,63	58,72	770,51	61,47	739,80	63,01	711,73	64,41	681,80	65,91
44	2000	25,48	98,73	978,50	51,07	1023,45	48,83	794,20	60,29	726,99	63,65	690,50	65,48	696,31	65,18
45	2000	0,00	100,00	1272,86	36,36	943,21	52,84	871,24	56,44	753,71	62,31	740,96	62,95	675,90	66,21
46	3000	17,25	99,43	953,55	68,21	797,35	73,42	751,49	74,95	732,32	75,59	708,23	76,39	713,47	76,22
47	3000	4,01	99,87	1047,93	65,07	1144,26	61,86	780,01	74,00	744,58	75,18	719,33	76,02	704,26	76,52
48	3000	1072,08	64,26	881,14	70,63	938,40	68,72	1100,80	63,31	772,08	74,26	766,00	74,47	736,90	75,44
49	3000	1452,54	51,58	931,89	68,94	932,04	68,93	850,57	71,65	740,02	75,33	693,44	76,89	687,17	77,09
50	4000	7,20	99,82	945,97	76,35	1076,33	73,09	783,66	80,41	719,37	82,02	706,91	82,33	706,99	82,33
		¹ ERP	91,52	ERP	70,95	ERP	74,45	ERP	76,69	ERP	78,56	ERP	79,27	ERP	79,83
		² ERP	92,19	ERP	89,59	ERP	72,61	ERP	75,17	ERP	77,29	ERP	78,08	ERP	78,63

Quadro 23- Resultados da primeira fase de medições de fios de náilon no sistema RoMe

(continua)

Amostra		89		100		111	
Nº	C (mm)	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%
1	1000	567,50	43,25	490,65	50,94	126,85	87,32
2	2000	608,79	69,56	492,51	75,37	152,02	92,40
3	3000	562,76	81,24	411,04	86,30	139,08	95,36
4	4000	512,25	87,19	508,93	87,28	362,05	90,95
5	5000	1260,20	74,80	1107,93	77,84	324,09	93,52
6	6000	1336,58	77,72	1286,21	78,56	908,37	84,86
7	7000	1401,72	79,98	1232,82	82,39	602,58	91,39
8	8000	1389,60	82,63	1292,93	83,84	1181,22	85,23
9	9000	1376,08	84,71	1300,75	85,55	872,69	90,30
10	10000	1391,61	86,08	1386,62	86,13	990,85	90,09
11	11000	1457,82	86,75	1457,95	86,75	1244,27	88,69
12	12000	1440,27	88,00	1244,64	89,63	1014,74	91,54
13	13000	1508,23	88,40	1504,70	88,43	1294,35	90,04
14	14000	1463,16	89,55	1377,64	90,16	1269,77	90,93
15	15000	1488,86	90,07	1436,38	90,42	1167,00	92,22
16	16000	1552,87	90,29	1543,29	90,35	1138,25	92,89
17	17000	1486,59	91,26	1643,28	90,33	1140,78	93,29
18	18000	2115,39	88,25	1808,26	89,95	1173,63	93,48
19	19000	1560,01	91,79	1578,99	91,69	1095,14	94,24
20	20000	1452,14	92,74	1391,71	93,04	1005,41	94,97
21	21000	2300,94	89,04	2058,56	90,20	1150,45	94,52
22	22000	1586,40	92,79	1611,15	92,68	996,62	95,47
23	23000	1659,47	92,78	1515,60	93,41	934,90	95,94
24	24000	1515,11	93,69	1463,27	93,90	1438,84	94,00
25	25000	1681,60	93,27	1693,48	93,23	1363,04	94,55
26	26000	1503,96	94,22	1531,02	94,11	1069,42	95,89
27	27000	1561,79	94,22	1592,89	94,10	1151,55	95,73
28	28000	1622,68	94,20	1639,95	94,14	1239,97	95,57

Quadro 23 - Resultados da primeira fase de medições de fios de náilon no sistema RoMe
(conclusão)

Amostra		89		100		111	
Nº	C (mm)	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%
29	29000	1512,38	94,78	1420,32	95,10	993,48	96,57
30	30000	1521,15	94,93	1386,02	95,38	1015,35	96,62
31*	1000	589,97	41,00	534,12	46,59	435,06	56,49
32*	2000	765,31	61,73	751,18	62,44	750,73	62,46
33*	3000	737,90	75,40	698,28	76,72	666,94	77,77
34*	4000	720,66	81,98	692,21	82,69	619,81	84,50
35	1000	560,33	43,97	518,43	48,16	518,96	48,10
36	2000	472,06	76,40	360,77	81,96	126,60	93,67
37	3000	685,42	77,15	571,69	80,94	217,98	92,73
38	4000	666,54	83,34	498,18	87,55	126,60	96,83
39	1000	649,09	35,09	632,00	36,80	626,45	37,36
40	2000	646,39	67,68	507,27	74,64	126,60	93,67
41	2000	626,39	68,68	430,56	78,47	314,24	84,29
42	2000	674,88	66,26	647,43	67,63	652,20	67,39
43	2000	651,57	67,42	549,01	72,55	324,71	83,76
44	2000	682,21	65,89	686,36	65,68	642,11	67,89
45	2000	717,64	64,12	698,09	65,10	698,52	65,07
46	3000	621,72	79,28	471,55	84,28	133,65	95,54
47	3000	709,88	76,34	699,44	76,69	682,38	77,25
48	3000	707,39	76,42	692,53	76,92	623,70	79,21
49	3000	687,68	77,08	680,72	77,31	682,21	77,26
50	4000	713,90	82,15	704,21	82,39	632,49	84,19
		¹ ERP	80,55	ERP	82,35	ERP	87,45
		² ERP	79,31	ERP	81,13	ERP	86,08

Fonte: O autor

Quadro 24- Resultados da segunda fase de medições de fios de náilon no sistema RoMe

(continua)

Amostra		19		21		25		27		29		31		33	
Nº	C (mm)	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%
1	1000	2896,603	189,66	1414,417	41,44	1016,34	1,63	954,37	4,56	978,14	2,19	908,77	9,12	821,48	17,85
2	2000	6876,599	243,83	1546,061	22,70	971,26	51,44	872,15	56,39	862,26	56,89	822,83	58,86	794,76	60,26
3	3000	1051,36	64,95	935,9194	68,80	919,13	69,36	885,28	70,49	874,27	70,86	888,11	70,40	872,73	70,91
4	4000	987,6686	75,31	911,1034	77,22	877,69	78,06	826,51	79,34	857,59	78,56	827,10	79,32	824,88	79,38
5	5000	12025,96	140,52	2563,13	48,74	1823,50	63,53	1803,34	63,93	1698,72	66,03	1655,31	66,89	1640,94	67,18
6	6000	2439,52	59,34	2043,36	65,94	1681,00	71,98	1612,68	73,12	1595,06	73,42	1560,80	73,99	1526,46	74,56
7	7000	8600,80	22,87	2942,47	57,96	1840,93	73,70	1823,00	73,96	1721,22	75,41	1681,24	75,98	1657,22	76,33
8	8000	16876,65	110,96	2925,14	63,44	1367,79	82,90	1790,62	77,62	1708,16	78,65	1678,93	79,01	1617,18	79,79
9	9000	4444,968	50,61	2054,24	77,18	1848,06	79,47	1807,64	79,92	1748,03	80,58	1681,80	81,31	1626,94	81,92
10	10000	18838,32	88,38	3597,09	64,03	1834,86	81,65	1788,47	82,12	1701,07	82,99	1697,92	83,02	1661,29	83,39
11	11000	11840,89	7,64	2295,53	79,13	1873,59	82,97	1699,05	84,55	1684,86	84,68	1629,73	85,18	1603,00	85,43
12	12000	10940,64	8,83	2488,69	79,26	1855,67	84,54	1771,25	85,24	1734,34	85,55	1711,33	85,74	1663,99	86,13
13	13000	11711,39	9,91	2467,68	81,02	1826,96	85,95	1753,41	86,51	1660,23	87,23	1699,15	86,93	1609,39	87,62
14	14000	3098,69	77,87	1954,24	86,04	1823,57	86,97	1741,71	87,56	1690,06	87,93	1680,68	88,00	1660,47	88,14
15	15000	7049,69	53,00	2390,94	84,06	1791,87	88,05	1759,06	88,27	1656,42	88,96	1626,11	89,16	1606,95	89,29
16	16000	4798,56	70,01	2090,03	86,94	1756,27	89,02	1683,47	89,48	1643,19	89,73	1608,66	89,95	1599,67	90,00
17	17000	27189,45	59,94	10324,49	39,27	1395,75	91,79	1777,05	89,55	1672,00	90,16	1628,04	90,42	1595,63	90,61

Quadro 24 - Resultados da segunda fase de medições de fios de náilon no sistema RoMe

(continua)

Amostra		19		21		25		27		29		31		33	
Nº	C (mm)	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%
18	18000	28148,84	56,38	12540,58	30,33	2838,04	84,23	2645,36	85,30	2538,40	85,90	2489,81	86,17	2438,36	86,45
19	19000	20867,74	9,83	2206,45	88,39	1724,72	90,92	1661,04	91,26	1627,48	91,43	1602,76	91,56	1588,62	91,64
20	20000	29479,39	47,40	4653,97	76,73	1335,08	93,32	1724,21	91,38	1660,34	91,70	1631,74	91,84	1604,78	91,98
21	21000	18043,65	14,08	3047,16	85,49	2635,14	87,45	2532,35	87,94	2492,55	88,13	2495,31	88,12	2464,95	88,26
22	22000	14141,72	35,72	2110,61	90,41	1695,22	92,29	1656,16	92,47	1633,17	92,58	1609,61	92,68	1581,22	92,81
23	23000	33372,66	45,10	24929,17	8,39	2200,03	90,43	1760,27	92,35	1676,96	92,71	1639,13	92,87	1624,51	92,94
24	24000	17246,12	28,14	3960,80	83,50	1755,69	92,68	1688,41	92,96	1617,18	93,26	1601,05	93,33	1594,96	93,35
25	25000	4686,33	81,25	2014,69	91,94	1659,19	93,36	1610,02	93,56	1589,31	93,64	1587,11	93,65	1578,83	93,68
26	26000	18067,21	30,51	7463,44	71,29	1849,01	92,89	1754,42	93,25	1689,36	93,50	1647,60	93,66	1678,40	93,54
27	27000	7480,47	72,29	2055,12	92,39	1699,65	93,70	1656,66	93,86	1636,28	93,94	1613,79	94,02	1608,64	94,04
28	28000	7295,12	73,95	2284,98	91,84	1769,49	93,68	1717,79	93,87	1683,62	93,99	1686,95	93,98	1655,95	94,09
29	29000	6921,61	76,13	2054,67	92,91	1756,83	93,94	1687,64	94,18	1660,42	94,27	1632,74	94,37	1639,73	94,35
30	30000	11820,57	60,60	3002,85	89,99	1732,67	94,22	1677,32	94,41	1660,36	94,47	1655,47	94,48	1638,24	94,54
31*	1000	0,00	100,00	0,00	100,00	6432,92	543,29	1562,78	56,28	1180,80	18,08	990,13	0,99	954,77	4,52
32*	2000	0,00	100,00	0,00	100,00	6217,10	210,86	1390,51	30,47	1058,82	47,06	968,31	51,58	960,68	51,97
33*	3000	0,00	100,00	0,00	100,00	1795,94	40,14	1188,47	60,38	964,44	67,85	946,93	68,44	948,39	68,39
34*	4000	0,00	100,00	0,00	100,00	2249,48	43,76	1172,85	70,68	936,03	76,60	900,54	77,49	876,75	78,08

Quadro 24 - Resultados da segunda fase de medições de fios de náilon no sistema RoMe

(conclusão)

Amostra		19		21		25		27		29		31		33	
Nº	C (mm)	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%
35	1000	7077,23	607,72	2169,52	116,95	1022,45	2,24	994,71	0,53	957,87	4,21	867,81	13,22	873,32	12,67
36	2000	1264,82	36,76	1021,03	48,95	969,92	51,50	919,36	54,03	920,05	54,00	889,02	55,55	862,95	56,85
37	3000	3232,77	7,76	1087,37	63,75	878,46	70,72	857,92	71,40	845,63	71,81	813,31	72,89	808,41	73,05
38	4000	1316,68	67,08	957,51	76,06	914,71	77,13	891,18	77,72	865,63	78,36	836,78	79,08	826,56	79,34
39	1000	5430,07	443,01	1105,66	10,57	908,14	9,19	875,47	12,45	864,31	13,57	863,30	13,67	895,09	10,49
40	2000	1696,20	15,19	1019,59	49,02	906,19	54,69	847,16	57,64	872,34	56,38	778,88	61,06	779,80	61,01
41	2000	2570,73	28,54	1052,77	47,36	842,36	57,88	794,20	60,29	803,81	59,81	781,60	60,92	785,11	60,74
42	2000	1349,49	32,53	965,61	51,72	997,94	50,10	1085,80	45,71	1059,99	47,00	1011,07	49,45	1032,49	48,38
43	2000	1205,43	39,73	958,54	52,07	874,07	56,30	853,46	57,33	849,59	57,52	842,91	57,85	829,98	58,50
44	2000	2880,99	44,05	1055,62	47,22	1017,42	49,13	1051,94	47,40	1041,05	47,95	1095,10	45,25	1020,76	48,96
45	2000	7674,85	283,74	6349,18	217,46	1039,86	48,01	931,98	53,40	918,83	54,06	897,37	55,13	875,40	56,23
46	3000	5030,06	67,67	1136,45	62,12	895,93	70,14	866,13	71,13	851,21	71,63	823,69	72,54	808,04	73,07
47	3000	10528,10	250,94	1858,23	38,06	949,46	68,35	903,80	69,87	931,00	68,97	1003,04	66,57	1127,49	62,42
48	3000	1154,32	61,52	931,24	68,96	889,78	70,34	827,75	72,41	840,63	71,98	841,40	71,95	904,52	69,85
49	3000	1102,76	63,24	957,46	68,08	947,16	68,43	1019,16	66,03	1113,52	62,88	1055,91	64,80	936,43	68,79
50	4000	2031,69	49,21	1110,92	72,23	915,60	77,11	966,43	75,84	976,53	75,59	1057,74	73,56	1093,06	72,67
		¹ ERP	88,34	ERP	69,72	ERP	72,55	ERP	73,10	ERP	73,37	ERP	74,08	ERP	74,42
		² ERP	89,27	ERP	72,15	ERP	83,51	ERP	71,61	ERP	71,69	ERP	72,12	ERP	72,53

Fonte: O autor.

APÊNDICE C - MEDIDAS DE FIOS DE NAILON NO SISTEMA TMM

Os resultados das medidas no sistema TMM para fios de náilon estão nos Quadros 25 e 26, que correspondem à primeira e segunda fase, respectivamente, descritas na metodologia, Seção 4.2.1. Os erros da linha identificada como ⁽¹⁾ desconsideram as amostras 31 a 34 para o cálculo, e os erros na linha identificada como ⁽²⁾ consideram estas amostras para o resultado.

Os limiares com erros percentuais médios que resultaram acima de 90% os anteriores ou posteriores, com resultado crescente a este valor não foram inclusos.

Importante frisar que este apêndice possui as medidas de todas as amostras, no entanto, na seção de resultados, as amostras 31 a 34 foram tratadas separadamente visto que apresentaram erros que extrapolavam 100% e interferiam no desempenho médio dos limiares considerados adequados para o restante amostral.

Quadro 25 - Resultados da primeira fase de medições de fios de náilon no sistema TMM

(continua)

Amostra		12		23		34		45		56		67		78	
Nº	C (mm)	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%
1	1000	0,00	100,00	1148,54	14,85	904,75	9,52	703,82	29,62	497,75	50,23	193,5422	80,65	15,80	98,42
2	2000	0,00	100,00	2342,21	17,11	1831,72	8,41	1542,31	22,88	1084,04	45,80	432,8494	78,36	15,80	99,21
3	3000	20981,64	599,39	3083,58	2,79	2495,19	16,83	1968,45	34,39	1408,45	53,05	505,3262	83,16	61,59	97,95
4	4000	16792,73	319,82	4049,77	1,24	3661,89	8,45	3165,33	20,87	2402,39	39,94	942,7469	76,43	140,47	96,49
5	5000	150,58	96,99	5114,37	2,29	4034,71	19,31	3053,79	38,92	2080,38	58,39	947,92	81,04	101,85	97,96
6	6000	7342,94	22,38	6047,11	0,79	4582,28	23,63	3223,59	46,27	1954,89	67,42	482,97	91,95	103,90	98,27
7	7000	20034,43	186,21	7968,51	13,84	6281,33	10,27	5471,11	21,84	4110,57	41,28	1845,21	73,64	239,75	96,57
8	8000	2301,23	71,23	9727,93	21,60	7566,90	5,41	6570,42	17,87	5607,63	29,90	4133,99	48,33	1317,11	83,54
9	9000	1818,91	79,79	9274,25	3,05	7891,74	12,31	6194,59	31,17	5045,78	43,94	3412,67	62,08	863,67	90,40
10	10000	115,99	98,84	10253,90	2,54	9116,98	8,83	8313,01	16,87	6594,61	34,05	3355,51	66,44	701,59	92,98
11	11000	913,10	91,70	11102,86	0,94	10063,21	8,52	8916,00	18,95	7508,33	31,74	4648,46	57,74	1168,99	89,37
12	12000	2738,83	77,18	12274,46	2,29	11245,09	6,29	10144,67	15,46	8489,47	29,25	4548,64	62,09	1182,65	90,14
13	13000	1393,24	89,28	13619,04	4,76	12455,39	4,19	10717,50	17,56	9016,00	30,65	5140,21	60,46	1137,54	91,25
14	14000	367,64	97,37	14392,94	2,81	12872,73	8,05	11026,21	21,24	9085,76	35,10	4796,88	65,74	958,41	93,15
15	15000	69,30	99,54	15441,03	2,94	14087,00	6,09	12504,73	16,64	10082,78	32,78	6467,53	56,88	2337,64	84,42
16	16000	2562,48	83,98	15895,37	0,65	13933,89	12,91	11858,06	25,89	8547,94	46,58	3783,29	76,35	1301,86	91,86
17	17000	1,89	99,99	18995,94	11,74	15155,38	10,85	12710,85	25,23	9089,64	46,53	3696,87	78,25	656,57	96,14

Quadro 25 - Resultados da primeira fase de medições de fios de náilon no sistema TMM

(continua)

Amostra		12		23		34		45		56		67		78	
Nº	C (mm)	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%
18	18000	263,85	98,53	20346,34	13,04	16199,30	10,00	14487,44	19,51	10525,76	41,52	4465,89	75,19	836,37	95,35
19	19000	541,52	97,15	19562,24	2,96	15764,32	17,03	12852,78	32,35	8833,31	53,51	3996,16	78,97	899,79	95,26
20	20000	547,22	97,26	21361,43	6,81	18197,35	9,01	16205,12	18,97	12081,00	39,60	4953,57	75,23	908,19	95,46
21	21000	301,36	98,56	21491,83	2,34	18746,61	10,73	16537,02	21,25	13098,43	37,63	6329,69	69,86	1061,50	94,95
22	22000	82,65	99,62	21906,86	0,42	19341,46	12,08	17043,16	22,53	13040,62	40,72	6277,98	71,46	884,55	95,98
23	23000	0,00	100,00	47546,68	106,72	20968,38	8,83	18515,72	19,50	15552,47	32,38	8650,76	62,39	2006,66	91,28
24	24000	0,00	100,00	24427,43	1,78	21760,04	9,33	19341,82	19,41	15216,93	36,60	7602,92	68,32	1098,30	95,42
25	25000	9,26	99,96	25441,00	1,76	22969,28	8,12	20411,58	18,35	15896,38	36,41	6840,66	72,64	954,43	96,18
26	26000	45,42	99,83	26600,03	2,31	23259,90	10,54	21055,90	19,02	16650,88	35,96	8487,39	67,36	1348,55	94,81
27	27000	42,67	99,84	26197,41	2,97	23377,86	13,42	20138,52	25,41	14811,58	45,14	6822,80	74,73	770,34	97,15
28	28000	4,43	99,98	28465,34	1,66	26430,93	5,60	24158,20	13,72	18576,45	33,66	8593,08	69,31	972,92	96,53
29	29000	106,30	99,63	27952,61	3,61	25150,79	13,27	22474,02	22,50	18012,55	37,89	7644,09	73,64	879,49	96,97
30	30000	195,54	99,35	30134,21	0,45	26789,61	10,70	24080,69	19,73	18929,49	36,90	8629,89	71,23	1098,46	96,34
31*	1000	0,00	100,00	37775,10	3677,51	1049,22	4,92	1021,17	2,12	879,94	12,01	469,42	53,06	244,35	75,56
32*	2000	0,00	100,00	46681,91	2234,10	2088,55	4,43	2048,13	2,41	1837,31	8,13	1368,81	31,56	745,64	62,72
33*	3000	0,00	100,00	59629,04	1887,63	3062,90	2,10	3015,11	0,50	2764,60	7,85	2178,61	27,38	1134,28	62,19
34*	4000	0,00	100,00	61538,91	1438,47	4150,90	3,77	4011,39	0,28	3366,86	15,83	1865,36	53,37	446,20	88,85

Quadro 25 - Resultados da primeira fase de medições de fios de náilon no sistema TMM

(conclusão)

Amostra		12		23		34		45		56		67		78	
Nº	C (mm)	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%
35	1000	0,00	100,00	1897,96	89,80	907,75	9,22	768,06	23,19	567,70	43,23	225,89	77,41	8,91	99,11
36	2000	11970,54	498,53	2107,88	5,39	1575,63	21,22	1189,00	40,55	656,17	67,19	110,71	94,46	0,00	100,00
37	3000	3404,78	13,49	3118,24	3,94	2386,67	20,44	1743,07	41,90	964,35	67,86	258,20	91,39	10,15	99,66
38	4000	6829,16	70,73	4171,52	4,29	3221,09	19,47	2420,95	39,48	1576,36	60,59	434,76	89,13	39,32	99,02
39	1000	39,19	96,08	1059,79	5,98	1328,88	32,89	1774,17	77,42	1338,59	33,86	1067,67	6,77	777,65	22,23
40	2000	514,97	74,25	2035,20	1,76	1580,01	21,00	1195,97	40,20	617,68	69,12	69,48	96,53	16,39	99,18
41	2000	1139,24	43,04	2095,16	4,76	1942,68	2,87	1422,61	28,87	957,02	52,15	273,89	86,31	65,73	96,71
42	2000	12256,32	512,82	2186,87	9,34	2270,58	13,53	1268,38	36,58	566,02	71,70	354,58	82,27	238,85	88,06
43	2000	8429,36	321,47	2125,15	6,26	1813,00	9,35	1303,39	34,83	928,50	53,57	430,62	78,47	109,08	94,55
44	2000	50,36	97,48	2140,01	7,00	2211,14	10,56	1138,32	43,08	696,31	65,18	400,41	79,98	297,68	85,12
45	2000	0,00	100,00	3775,96	88,80	2520,18	26,01	2144,04	7,20	1695,73	15,21	1319,58	34,02	839,87	58,01
46	3000	43,42	98,55	3094,54	3,15	2400,92	19,97	1417,82	52,74	663,01	77,90	191,85	93,61	25,35	99,16
47	3000	4,74	99,84	3646,71	21,56	3543,70	18,12	1992,62	33,58	1222,42	59,25	566,90	81,10	368,68	87,71
48	3000	2007,03	33,10	3164,90	5,50	3453,06	15,10	3434,58	14,49	2675,29	10,82	1540,98	48,63	842,75	71,91
49	3000	2156,02	28,13	3182,25	6,08	3472,19	15,74	2272,96	24,23	1276,88	57,44	558,03	81,40	381,99	87,27
50	4000	13,27	99,67	4213,98	5,35	4368,35	9,21	2647,85	33,80	1438,91	64,03	783,48	80,41	429,48	89,26
		¹ ERP	128,06	ERP	11,35	ERP	12,68	ERP	27,52	ERP	45,51	ERP	72,43	ERP	91,45
		² ERP	125,81	ERP	195,19	ERP	11,97	ERP	25,43	ERP	42,75	ERP	69,94	ERP	89,92

Fonte: O autor.

Quadro 26 - Resultados da segunda fase de medições de fios de náilon no sistema TMM

(continua)

Amostra		21		25		27		29		31		33	
Nº	C (mm)	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%
1	1000	2685,49	168,55	1040,17	4,02	1036,84	3,68	1036,84	3,68	969,52	3,05	921,48	7,85
2	2000	4900,45	145,02	2065,47	3,27	2030,12	1,51	2030,12	1,51	1912,29	4,39	1862,72	6,86
3	3000	3114,66	3,82	2985,40	0,49	2825,47	5,82	2825,47	5,82	2599,16	13,36	2539,23	15,36
4	4000	4092,67	2,32	3953,50	1,16	3928,77	1,78	3928,77	1,78	3754,82	6,13	3698,73	7,53
5	5000	10081,70	101,63	4808,44	3,83	4658,59	6,83	4658,59	6,83	4258,93	14,82	4119,63	17,61
6	6000	6089,18	1,49	5860,74	2,32	5635,57	6,07	5635,57	6,07	4986,62	16,89	4730,85	21,15
7	7000	12903,16	84,33	7198,16	2,83	7001,26	0,02	7001,26	0,02	6625,52	5,35	6395,99	8,63
8	8000	24040,77	200,51	8422,91	5,29	8301,25	3,77	8301,25	3,77	7947,34	0,66	7688,83	3,89
9	9000	10284,49	14,27	9183,16	2,04	9069,10	0,77	9069,10	0,77	8545,10	5,05	8096,31	10,04
10	10000	15579,73	55,80	9808,72	1,91	9680,40	3,20	9680,40	3,20	9348,79	6,51	9185,61	8,14
11	11000	13451,19	22,28	10934,65	0,59	10865,25	1,22	10865,25	1,22	10474,53	4,78	10207,76	7,20
12	12000	14426,78	20,22	12180,32	1,50	12031,66	0,26	12031,66	0,26	11635,61	3,04	11369,37	5,26
13	13000	16828,35	29,45	13479,18	3,69	13443,25	3,41	13443,25	3,41	12987,30	0,10	12626,25	2,88
14	14000	14548,54	3,92	14354,76	2,53	14202,11	1,44	14202,11	1,44	13549,03	3,22	13067,33	6,66
15	15000	16963,21	13,09	15145,00	0,97	14945,46	0,36	14945,46	0,36	14468,62	3,54	14217,54	5,22
16	16000	16345,05	2,16	15683,09	1,98	15288,74	4,45	15288,74	4,45	14453,31	9,67	14088,82	11,94
17	17000	44070,27	159,24	17479,58	2,82	17164,60	0,97	17164,60	0,97	15983,46	5,98	15434,45	9,21

Quadro 26 - Resultados da segunda fase de medições de fios de náilon no sistema TMM

(continua)

Amostra		21		25		27		29		31		33	
Nº	C (mm)	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%
18	18000	46827,26	160,15	18328,24	1,82	17782,42	1,21	17782,42	1,21	16758,59	6,90	16382,34	8,99
19	19000	20977,62	10,41	18901,44	0,52	18079,17	4,85	18079,17	4,85	16632,53	12,46	16033,27	15,61
20	20000	33093,22	65,47	20269,52	1,35	19820,92	0,90	19820,92	0,90	18808,57	5,96	18397,43	8,01
21	21000	22205,18	5,74	21275,28	1,31	20758,31	1,15	20758,31	1,15	19590,74	6,71	19021,84	9,42
22	22000	22563,65	2,56	21723,48	1,26	21377,97	2,83	21377,97	2,83	20215,19	8,11	19629,14	10,78
23	23000	72629,26	215,78	26597,72	15,64	22753,25	1,07	22237,88	3,31	21745,86	5,45	21210,19	7,78
24	24000	31090,41	29,54	24090,78	0,38	23855,39	0,60	23310,13	2,87	22605,27	5,81	21998,14	8,34
25	25000	26081,70	4,33	25225,76	0,90	24744,78	1,02	24223,94	3,10	23683,82	5,26	23185,24	7,26
26	26000	39575,41	52,21	25825,99	0,67	25217,83	3,01	24508,55	5,74	23944,48	7,91	23456,42	9,78
27	27000	26867,98	0,49	26115,43	3,28	25811,83	4,40	25129,25	6,93	24329,68	9,89	23683,54	12,28
28	28000	29645,40	5,88	28371,03	1,33	28177,71	0,63	27730,39	0,96	27149,35	3,04	26654,83	4,80
29	29000	28546,73	1,56	27810,10	4,10	27318,22	5,80	26706,28	7,91	26098,26	10,01	25453,19	12,23
30	30000	33573,33	11,91	29774,41	0,75	29202,05	2,66	28459,54	5,13	27677,51	7,74	27080,87	9,73
31*	1000	12639,13	1163,91	37413,80	3641,38	3953,82	295,38	1611,68	61,17	1103,86	10,39	1064,12	6,41
32*	2000	15714,65	685,73	28919,65	1345,98	4238,56	111,93	2348,47	17,42	2142,96	7,15	2104,92	5,25
33*	3000	18886,41	529,55	10261,71	242,06	3745,70	24,86	3161,14	5,37	3104,88	3,50	3075,30	2,51
34*	4000	23628,76	490,72	13373,10	234,33	4818,54	20,46	4288,63	7,22	4203,34	5,08	4163,85	4,10

Quadro 26 - Resultados da segunda fase de medições de fios de náilon no sistema TMM

(conclusão)

Amostra		21		25		27		29		31		33	
Nº	C (mm)	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%
35	1000	8300,83	730,08	1080,73	8,07	1043,57	4,36	999,00	0,10	959,81	4,02	918,58	8,14
36	2000	2144,96	7,25	2067,00	3,35	1921,97	3,90	1794,39	10,28	1702,36	14,88	1622,63	18,87
37	3000	3491,75	16,39	3065,73	2,19	2949,82	1,67	2778,71	7,38	2597,33	13,42	2449,58	18,35
38	4000	4221,59	5,54	4122,51	3,06	3967,93	0,80	3712,99	7,18	3477,45	13,06	3306,95	17,33
39	1000	1475,17	47,52	1043,00	4,30	1039,44	3,94	1059,35	5,94	1156,46	15,65	1260,25	26,03
40	2000	2123,01	6,15	1995,12	0,24	1939,44	3,03	1847,47	7,63	1749,07	12,55	1627,34	18,63
41	2000	2386,31	19,32	2088,68	4,43	2076,57	3,83	2059,93	3,00	2031,46	1,57	1976,22	1,19
42	2000	2141,32	7,07	2502,78	25,14	2708,51	35,43	2783,40	39,17	2760,52	38,03	2474,40	23,72
43	2000	2151,56	7,58	2113,41	5,67	2093,98	4,70	2049,68	2,48	1951,41	2,43	1863,79	6,81
44	2000	2342,39	17,12	2275,92	13,80	2447,20	22,36	2629,16	31,46	2547,04	27,35	2351,24	17,56
45	2000	24831,61	1141,58	2381,18	19,06	2180,89	9,04	2393,63	19,68	2471,59	23,58	2540,99	27,05
46	3000	3602,55	20,08	3073,70	2,46	3034,30	1,14	2876,18	4,13	2739,19	8,69	2515,49	16,15
47	3000	8216,03	173,87	3164,56	5,49	3176,66	5,89	3377,38	12,58	3574,20	19,14	3614,24	20,47
48	3000	3231,29	7,71	3140,39	4,68	3191,96	6,40	3285,82	9,53	3409,81	13,66	3421,96	14,07
49	3000	3463,16	15,44	3262,49	8,75	3431,95	14,40	3645,09	21,50	3568,76	18,96	3474,97	15,83
50	4000	4575,11	14,38	4179,74	4,49	4329,47	8,24	4466,68	11,67	4589,76	14,74	4486,65	12,17
		¹ ERP	83,29	ERP	4,12	ERP	4,45	ERP	6,22	ERP	9,64	ERP	11,80
		² ERP	134,02	ERP	113,07	ERP	13,15	ERP	7,55	ERP	9,39	ERP	11,22

Fonte: O autor.

APÊNDICE D - MEDIDAS DE RAÍZES NO SISTEMA WINRHIZO

Os resultados das medidas no sistema WinRhizo para raízes de milho estão nos Quadros 27 e 28, que correspondem à primeira e segunda fase, respectivamente, descritas na metodologia, Seção 4.2.2.

Os limiares com erros percentuais médios que resultaram acima de 90% os anteriores ou posteriores, com resultado crescente a este valor não foram inclusos.

Quadro 27- Resultados da primeira fase de medições de raízes no sistema WinRhizo

(continua)

Amostra		23		25		34		45		56	
Nº	C (mm)	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%
1	7000,71	9702,50	38,59	8967,44	28,09	8708,03	24,39	5793,44	17,25	1392,09	80,12
2	4957,86	7537,51	52,03	6414,79	29,39	5939,87	19,81	3303,77	33,36	495,40	90,01
3	7629,29	11283,62	47,90	10643,72	39,51	10313,44	35,18	5303,74	30,48	552,08	92,76
4	6639,29	11745,83	76,91	9998,16	50,59	9365,24	41,06	6693,03	0,81	1697,83	74,43
5	1634,29	2952,99	80,69	2465,95	50,89	2014,99	23,30	966,82	40,84	237,18	85,49
6	12147,14	19169,01	57,81	16260,88	33,87	15840,68	30,41	10909,48	10,19	1920,55	84,19
7	2231,43	3052,23	36,78	2926,68	31,16	2627,19	17,74	1475,35	33,88	189,82	91,49
8	7401,43	11544,48	55,98	10155,46	37,21	9683,22	30,83	5839,42	21,10	929,27	87,44
9	3087,86	4305,89	39,45	4258,47	37,91	3819,22	23,69	2016,91	34,68	435,38	85,90
10	8391,43	12849,72	53,13	11807,39	40,71	11525,72	37,35	9511,45	13,35	3064,16	63,48
11	3873,57	5521,83	42,55	4838,95	24,92	4583,84	18,34	3324,98	14,16	756,12	80,48
12	14119,29	20039,37	41,93	18287,61	29,52	18089,99	28,12	13625,77	3,50	4083,13	71,08
13	2412,14	4177,40	73,18	3476,29	44,12	3067,91	27,19	1949,34	19,19	683,92	71,65
14	2459,29	3115,80	26,70	3020,38	22,82	2971,93	20,85	2118,48	13,86	590,81	75,98
15	8147,86	17273,97	112,01	13544,91	66,24	12390,24	52,07	8469,73	3,95	2662,92	67,32
16	4022,86	5656,98	40,62	4951,85	23,09	4601,05	14,37	2952,40	26,61	813,39	79,78
17	7511,43	16754,03	123,05	13177,29	75,43	12166,38	61,97	9206,90	22,57	2791,37	62,84

Quadro 27 - Resultados da primeira fase de medições de raízes no sistema WinRhizo

(conclusão)

Amostra		23		25		34		45		56	
N°	C (mm)	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%
18	2883,57	4175,31	44,80	3969,55	37,66	3635,40	26,07	1846,21	35,97	434,17	84,94
19	11188,57	14466,11	29,29	14301,93	27,83	13544,92	21,06	8127,49	27,36	2358,00	78,92
20	2027,14	2704,01	33,39	2658,94	31,17	2352,87	16,07	1545,50	23,76	681,26	66,39
21	7487,86	11061,97	47,73	9020,86	20,47	8580,96	14,60	5571,36	25,59	1663,13	77,79
22	1225,71	1734,87	41,54	1633,23	33,25	1387,28	13,18	615,15	49,81	175,81	85,66
23	8462,14	11570,70	36,73	11268,85	33,17	11067,03	30,78	7029,61	16,93	1636,73	80,66
24	2333,57	3447,67	47,74	3236,39	38,69	3098,85	32,79	2471,62	5,92	897,59	61,54
25	5806,43	7906,71	36,17	7844,34	35,10	7539,65	29,85	4970,70	14,39	1324,91	77,18
26	3158,57	4404,04	39,43	4348,52	37,67	4083,35	29,28	2734,75	13,42	699,92	77,84
27	13003,57	24331,73	87,12	19249,98	48,04	17965,64	38,16	13197,75	1,49	3299,23	74,63
28	6112,86	9230,67	51,00	7915,09	29,48	7473,88	22,26	5671,44	7,22	1857,80	69,61
29	10630,71	22251,68	109,32	18214,42	71,34	17712,49	66,62	12075,61	13,59	2619,99	75,35
30	3378,57	39881,41	1080,42	14971,54	343,13	4428,11	31,06	3338,96	1,17	820,44	75,72
		ERP	89,47	ERP	48,41	ERP	29,28	ERP	19,21	ERP	77,69

Fonte: O autor

Quadro 28- Resultados da segunda fase de medições de raízes no sistema WinRhizo

(continua)

Amostra		40		41		42		43		44	
Nº	C (mm)	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%
1	7000,71	7594,47	8,48	7311,78	4,44	6962,50	0,55	6618,49	5,46	6223,28	11,11
2	4957,86	4883,96	1,49	4594,22	7,33	4285,72	13,56	3969,56	19,93	3650,07	26,38
3	7629,29	8189,31	7,34	7650,04	0,27	7101,36	6,92	6552,33	14,12	5904,43	22,61
4	6639,29	8595,15	29,46	8306,83	25,12	7973,93	20,10	7576,11	14,11	7136,27	7,49
5	1634,29	1486,03	9,07	1376,33	15,78	1264,62	22,62	1157,43	29,18	1056,79	35,34
6	12147,14	14423,49	18,74	13872,80	14,21	13286,21	9,38	12568,93	3,47	11798,09	2,87
7	2231,43	2134,19	4,36	2028,24	9,11	1899,83	14,86	1752,26	21,47	1628,36	27,03
8	7401,43	8292,80	12,04	7896,31	6,69	7421,48	0,27	6939,52	6,24	6409,49	13,40
9	3087,86	2946,97	4,56	2754,88	10,78	2577,69	16,52	2389,39	22,62	2190,05	29,08
10	8391,43	10963,49	30,65	10733,41	27,91	10513,17	25,28	10234,72	21,97	9925,67	18,28
11	3873,57	4236,22	9,36	4098,63	5,81	3958,48	2,19	3756,39	3,03	3546,67	8,44
12	14119,29	16668,90	18,06	16206,08	14,78	15735,90	11,45	15133,46	7,18	14405,68	2,03
13	2412,14	2635,02	9,24	2515,38	4,28	2380,63	1,31	2221,19	7,92	2082,36	13,67
14	2459,29	2670,69	8,60	2577,60	4,81	2476,64	0,71	2381,74	3,15	2252,27	8,42
15	8147,86	10927,49	34,11	10543,78	29,41	10046,89	23,31	9549,07	17,20	9032,20	10,85
16	4022,86	4043,48	0,51	3865,67	3,91	3641,14	9,49	3423,25	14,91	3176,62	21,04
17	7511,43	11237,20	49,60	10954,16	45,83	10584,65	40,91	10207,19	35,89	9723,09	29,44

Quadro 28 - Resultados da segunda fase de medições de raízes no sistema WinRhizo

(continua)

Amostra		40		41		42		43		44	
N°	C (mm)	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%
18	2883,57	2897,26	0,47	2687,46	6,80	2469,69	14,35	2252,35	21,89	2048,98	28,94
19	11188,57	11136,27	0,47	10569,52	5,53	9999,41	10,63	9357,08	16,37	8744,93	21,84
20	2027,14	1976,16	2,52	1901,16	6,22	1798,14	11,30	1722,66	15,02	1636,60	19,27
21	7487,86	7343,05	1,93	7040,24	5,98	6715,43	10,32	6336,83	15,37	5952,84	20,50
22	1225,71	1040,37	15,12	954,62	22,12	869,23	29,08	783,50	36,08	699,28	42,95
23	8462,14	9537,98	12,71	9111,14	7,67	8646,14	2,17	8114,99	4,10	7579,12	10,44
24	2333,57	2900,45	24,29	2857,29	22,44	2768,98	18,66	2689,84	15,27	2593,41	11,13
25	5806,43	6524,09	12,36	6269,31	7,97	5984,98	3,08	5674,78	2,27	5304,27	8,65
26	3158,57	3543,60	12,19	3413,73	8,08	3247,08	2,80	3109,82	1,54	2944,06	6,79
27	13003,57	16561,87	27,36	16024,06	23,23	15481,34	19,05	14806,47	13,86	14043,53	8,00
28	6112,86	6900,25	12,88	6724,80	10,01	6504,17	6,40	6256,38	2,35	6000,33	1,84
29	10630,71	16054,03	51,02	15345,53	44,35	14645,23	37,76	13883,97	30,60	13016,44	22,44
30	3378,57	4084,28	20,89	3974,94	17,65	3833,97	13,48	3688,81	9,18	3510,83	3,91
		ERP	15,00	ERP	13,95	ERP	13,28	ERP	14,39	ERP	16,47

Fonte: O autor

Quadro 28 - Resultados da segunda fase de medições de raízes no sistema WinRhizo

(continua)

Amostra		46		47		48		49		50	
Nº	C (mm)	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%
1	7000,71	5376,64	23,20	4939,01	29,45	4503,38	35,67	4047,71	42,18	3608,03	48,46
2	4957,86	2958,93	40,32	2661,28	46,32	2336,00	52,88	2060,05	58,45	1774,48	64,21
3	7629,29	4639,40	39,19	4030,27	47,17	3426,67	55,09	2864,99	62,45	2370,41	68,93
4	6639,29	6219,71	6,32	5699,27	14,16	5170,19	22,13	4659,24	29,82	4164,46	37,28
5	1634,29	902,20	44,80	849,68	48,01	800,92	50,99	717,65	56,09	632,25	61,31
6	12147,14	9935,78	18,20	8972,97	26,13	7946,81	34,58	7015,33	42,25	6076,39	49,98
7	2231,43	1349,37	39,53	1224,59	45,12	1101,53	50,64	924,53	58,57	773,60	65,33
8	7401,43	5296,54	28,44	4751,10	35,81	4167,71	43,69	3645,33	50,75	3124,76	57,78
9	3087,86	1845,24	40,24	1683,16	45,49	1509,89	51,10	1330,73	56,90	1153,44	62,65
10	8391,43	9084,01	8,25	8570,57	2,13	8060,22	3,95	7472,09	10,96	6832,20	18,58
11	3873,57	3091,20	20,20	2848,64	26,46	2619,04	32,39	2370,32	38,81	2117,02	45,35
12	14119,29	12738,93	9,78	11788,42	16,51	10801,64	23,50	9802,23	30,58	8882,65	37,09
13	2412,14	1802,29	25,28	1662,56	31,08	1546,39	35,89	1456,71	39,61	1344,77	44,25
14	2459,29	1985,89	19,25	1821,11	25,95	1688,79	31,33	1536,55	37,52	1401,12	43,03
15	8147,86	7837,38	3,81	7196,05	11,68	6583,17	19,20	5974,62	26,67	5377,12	34,01
16	4022,86	2700,05	32,88	2462,93	38,78	2233,54	44,48	2003,48	50,20	1804,58	55,14
17	7511,43	8624,81	14,82	8052,88	7,21	7365,31	1,95	6690,79	10,93	6039,90	19,59

Quadro 28 - Resultados da segunda fase de medições de raízes no sistema WinRhizo

(conclusão)

Amostra		46		47		48		49		50	
Nº	C (mm)	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%
18	2883,57	1670,64	42,06	1494,31	48,18	1323,95	54,09	1179,29	59,10	1050,41	63,57
19	11188,57	7465,05	33,28	6830,42	38,95	6209,16	44,50	5603,21	49,92	5005,98	55,26
20	2027,14	1459,35	28,01	1377,89	32,03	1294,83	36,13	1206,19	40,50	1112,40	45,12
21	7487,86	5130,22	31,49	4698,81	37,25	4291,38	42,69	3897,77	47,95	3511,39	53,11
22	1225,71	543,96	55,62	492,05	59,86	445,92	63,62	401,08	67,28	352,56	71,24
23	8462,14	6454,84	23,72	5867,14	30,67	5262,74	37,81	4714,02	44,29	4185,60	50,54
24	2333,57	2360,06	1,13	2230,01	4,44	2127,17	8,84	1975,51	15,34	1796,29	23,02
25	5806,43	4620,74	20,42	4263,73	26,57	3889,36	33,02	3526,32	39,27	3167,87	45,44
26	3158,57	2577,13	18,41	2376,85	24,75	2159,34	31,64	1966,70	37,73	1752,42	44,52
27	13003,57	12260,57	5,71	11291,62	13,17	10295,54	20,83	9268,79	28,72	8315,53	36,05
28	6112,86	5326,68	12,86	4991,98	18,34	4649,92	23,93	4276,21	30,05	3907,53	36,08
29	10630,71	11051,34	3,96	10025,87	5,69	8975,14	15,57	8013,44	24,62	7021,29	33,95
30	3378,57	3154,23	6,64	2938,17	13,04	2737,39	18,98	2500,74	25,98	2241,19	33,66
		ERP	23,26	ERP	28,35	ERP	34,04	ERP	40,45	ERP	46,82

Fonte: O autor

APÊNDICE E - MEDIDAS DE RAÍZES NO SISTEMA ROME

Os resultados das medidas no sistema RoMe para raízes de milho estão nos Quadros 29 e 30, que correspondem à primeira e segunda fase, respectivamente, descritas na metodologia, Seção 4.2.2.

Os limiares com erros percentuais médios que resultaram acima de 90% os anteriores ou posteriores, com resultado crescente a este valor não foram inclusos.

Quadro 29- Resultados da primeira fase de medições de raízes no sistema RoMe

(continua)

Amostra		21		23		34		45		56		67	
N°	C (mm)	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%
1	7000,71	18582,99	165,44	9712,35	38,73	5771,79	17,55	1210,49	82,71	824,97	88,22	772,54	88,96
2	4957,86	14381,44	190,07	3645,80	26,46	2223,02	55,16	925,80	81,33	802,41	83,82	818,48	83,49
3	7629,29	18161,34	138,05	9841,46	29,00	6010,46	21,22	864,28	88,67	771,01	89,89	726,75	90,47
4	6639,29	16816,51	153,29	6716,15	1,16	5082,47	23,45	1336,68	79,87	763,71	88,50	826,78	87,55
5	1634,29	2124,49	29,99	1124,23	31,21	953,74	41,64	841,23	48,53	747,08	54,29	749,43	54,14
6	12147,14	21861,01	79,97	21619,99	77,98	16826,46	38,52	2397,04	80,27	791,08	93,49	788,34	93,51
7	2231,43	1800,84	19,30	1358,34	39,13	1105,40	50,46	912,62	59,10	870,52	60,99	831,93	62,72
8	7401,43	21556,02	191,24	17050,30	130,36	5410,20	26,90	952,01	87,14	825,60	88,85	917,94	87,60
9	3087,86	2667,51	13,61	2518,31	18,44	1253,32	59,41	858,37	72,20	786,55	74,53	800,63	74,07
10	8391,43	21066,88	151,05	14984,29	78,57	11113,91	32,44	2214,11	73,61	768,09	90,85	772,52	90,79
11	3873,57	3848,44	0,65	2763,76	28,65	1827,82	52,81	882,59	77,22	745,53	80,75	737,85	80,95
12	14119,29	23176,58	64,15	15205,07	7,69	12041,16	14,72	3307,30	76,58	697,94	95,06	679,51	95,19
13	2412,14	4354,14	80,51	1592,43	33,98	1062,61	55,95	821,70	65,93	767,68	68,17	696,67	71,12
14	2459,29	1662,00	32,42	1512,54	38,50	1342,53	45,41	873,04	64,50	674,02	72,59	686,88	72,07
15	8147,86	25430,05	212,11	14011,95	71,97	7176,37	11,92	1127,07	86,17	715,98	91,21	683,35	91,61
16	4022,86	5637,36	40,13	3931,34	2,28	1854,56	53,90	817,43	79,68	743,61	81,52	822,09	79,56
17	7511,43	22891,16	204,75	14539,58	93,57	9674,31	28,79	1830,47	75,63	815,12	89,15	861,72	88,53

Quadro 29 - Resultados da primeira fase de medições de raízes no sistema RoMe

(continua)

Amostra		21		23		34		45		56		67	
Nº	C (mm)	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%
18	2883,57	2491,90	13,58	1849,72	35,85	1249,42	56,67	790,19	72,60	732,62	74,59	755,59	73,80
19	11188,57	14047,58	25,55	11168,41	0,18	8919,67	20,28	995,56	91,10	768,60	93,13	766,48	93,15
20	2027,14	1234,83	39,09	1210,66	40,28	994,78	50,93	823,60	59,37	871,80	56,99	788,80	61,09
21	7487,86	20337,90	171,61	8444,86	12,78	4593,19	38,66	948,23	87,34	726,98	90,29	699,05	90,66
22	1225,71	1117,09	8,86	1008,86	17,69	888,79	27,49	848,71	30,76	841,03	31,38	836,15	31,78
23	8462,14	10578,78	25,01	9424,24	11,37	7781,06	8,05	1098,44	87,02	750,29	91,13	756,57	91,06
24	2333,57	1577,27	32,41	1230,44	47,27	962,99	58,73	885,18	62,07	714,68	69,37	673,97	71,12
25	5806,43	5874,41	1,17	5065,11	12,77	4211,51	27,47	947,01	83,69	782,92	86,52	793,32	86,34
26	3158,57	2585,02	18,16	2529,51	19,92	1919,29	39,24	873,90	72,33	811,10	74,32	795,25	74,82
27	13003,57	22301,83	71,51	21383,60	64,44	17107,75	31,56	10534,64	18,99	832,76	93,60	807,66	93,79
28	6112,86	7760,02	26,95	6157,85	0,74	4693,66	23,22	1823,77	70,16	912,19	85,08	770,31	87,40
29	10630,71	22572,88	112,34	23424,81	120,35	18005,47	69,37	3076,94	71,06	726,22	93,17	636,22	94,02
30	3378,57	1005,30	70,24	11655,36	244,98	2589,50	23,36	1377,18	59,24	850,68	74,82	859,11	74,57
		ERP	79,44	ERP	45,88	ERP	36,84	ERP	71,49	ERP	80,21	ERP	80,53

Quadro 29 - Resultados da primeira fase de medições de raízes no sistema RoMe

(continua)

Amostra		78		89		100		111		122		133	
N°	C (mm)	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%
1	7000,71	734,33	89,51	702,39	89,97	696,52	90,05	767,26	89,04	743,12	89,39	580,48	91,71
2	4957,86	755,34	84,76	732,40	85,23	685,86	86,17	673,41	86,42	534,54	89,22	279,94	94,35
3	7629,29	839,78	88,99	817,21	89,29	644,95	91,55	491,86	93,55	446,76	94,14	388,37	94,91
4	6639,29	862,93	87,00	781,25	88,23	794,45	88,03	795,75	88,01	688,46	89,63	640,02	90,36
5	1634,29	704,53	56,89	733,78	55,10	624,22	61,80	627,05	61,63	594,46	63,63	416,17	74,54
6	12147,14	827,05	93,19	808,44	93,34	795,54	93,45	540,43	95,55	349,19	97,13	327,37	97,30
7	2231,43	930,74	58,29	973,85	56,36	775,15	65,26	774,17	65,31	709,06	68,22	476,03	78,67
8	7401,43	851,95	88,49	841,35	88,63	668,50	90,97	663,96	91,03	599,46	91,90	566,38	92,35
9	3087,86	742,03	75,97	868,85	71,86	767,95	75,13	511,37	83,44	432,66	85,99	279,56	90,95
10	8391,43	766,02	90,87	711,62	91,52	671,14	92,00	607,99	92,75	565,89	93,26	569,06	93,22
11	3873,57	720,73	81,39	688,56	82,22	601,00	84,48	658,68	83,00	405,30	89,54	382,78	90,12
12	14119,29	760,64	94,61	795,45	94,37	719,97	94,90	675,49	95,22	566,22	95,99	264,38	98,13
13	2412,14	687,21	71,51	601,83	75,05	607,13	74,83	586,66	75,68	354,66	85,30	270,05	88,80
14	2459,29	719,96	70,72	736,47	70,05	528,94	78,49	545,05	77,84	510,41	79,25	413,13	83,20
15	8147,86	730,98	91,03	798,24	90,20	671,02	91,76	700,27	91,41	675,62	91,71	458,93	94,37
16	4022,86	831,68	79,33	748,15	81,40	599,51	85,10	575,61	85,69	520,95	87,05	280,48	93,03
17	7511,43	925,91	87,67	905,90	87,94	906,70	87,93	812,13	89,19	831,24	88,93	783,77	89,57

Quadro 29 - Resultados da primeira fase de medições de raízes no sistema RoMe

Amostra		78		89		100		111		122		133	
Nº	C (mm)	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%
18	2883,57	746,92	74,10	891,12	69,10	711,38	75,33	591,89	79,47	637,89	77,88	574,92	80,06
19	11188,57	955,10	91,46	873,28	92,19	721,45	93,55	779,77	93,03	751,78	93,28	730,83	93,47
20	2027,14	746,13	63,19	754,25	62,79	784,94	61,28	603,78	70,22	529,86	73,86	457,24	77,44
21	7487,86	613,02	91,81	568,59	92,41	617,54	91,75	658,47	91,21	537,44	92,82	527,31	92,96
22	1225,71	730,83	40,38	722,21	41,08	748,25	38,95	773,00	36,94	667,33	45,56	613,37	49,96
23	8462,14	893,96	89,44	798,41	90,56	776,96	90,82	799,80	90,55	484,12	94,28	474,17	94,40
24	2333,57	718,80	69,20	833,18	64,30	709,19	69,61	758,64	67,49	563,52	75,85	563,47	75,85
25	5806,43	915,92	84,23	814,83	85,97	820,04	85,88	793,66	86,33	540,85	90,69	450,71	92,24
26	3158,57	875,66	72,28	980,17	68,97	1009,10	68,05	804,24	74,54	611,78	80,63	479,55	84,82
27	13003,57	972,14	92,52	1023,15	92,13	908,61	93,01	827,67	93,64	590,79	95,46	442,39	96,60
28	6112,86	950,37	84,45	1026,18	83,21	894,21	85,37	786,56	87,13	647,68	89,40	566,07	90,74
29	10630,71	665,78	93,74	764,01	92,81	785,84	92,61	687,88	93,53	619,15	94,18	487,16	95,42
30	3378,57	898,48	73,41	828,55	75,48	679,54	79,89	804,17	76,20	458,21	86,44	377,77	88,82
		ERP	80,35	ERP	80,06	ERP	81,93	ERP	82,83	ERP	85,69	ERP	88,28

Fonte: O autor

Quadro 30 - Resultados da segunda fase de medições de raízes no sistema RoMe

(continua)

Amostra		29		30		31		32		33	
Nº	C (mm)	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%
1	7000,71	6578,34	6,03	6413,53	8,39	6129,91	12,44	6013,75	14,10	5976,72	14,63
2	4957,86	2581,08	47,94	2560,56	48,35	2488,80	49,80	2433,66	50,91	2332,88	52,95
3	7629,29	8052,93	5,55	8015,40	5,06	7382,22	3,24	7314,53	4,13	6255,13	18,01
4	6639,29	5365,89	19,18	5308,91	20,04	5224,71	21,31	5203,12	21,63	5109,39	23,04
5	1634,29	1021,46	37,50	1017,38	37,75	1019,62	37,61	1036,86	36,56	995,19	39,11
6	12147,14	17482,51	43,92	17283,23	42,28	17024,20	40,15	16889,86	39,04	16824,90	38,51
7	2231,43	1149,33	48,49	1172,23	47,47	1137,78	49,01	1117,38	49,93	1115,63	50,00
8	7401,43	14574,38	96,91	14287,82	93,04	13704,02	85,15	13453,01	81,76	5887,11	20,46
9	3087,86	1794,18	41,90	1733,45	43,86	1587,32	48,59	1523,14	50,67	1397,72	54,74
10	8391,43	11873,08	41,49	11775,32	40,33	11435,94	36,28	11340,86	35,15	11234,26	33,88
11	3873,57	2154,46	44,38	2123,27	45,19	2082,77	46,23	2036,82	47,42	1935,85	50,02
12	14119,29	12487,39	11,56	12231,85	13,37	12132,94	14,07	12164,02	13,85	12076,73	14,47
13	2412,14	1290,92	46,48	1206,66	49,98	1189,47	50,69	1132,27	53,06	1108,52	54,04
14	2459,29	1338,47	45,57	1326,83	46,05	1330,36	45,90	1319,13	46,36	1340,00	45,51
15	8147,86	9829,77	20,64	9716,67	19,25	9517,66	16,81	8623,94	5,84	8320,18	2,11
16	4022,86	3493,75	13,15	3437,98	14,54	3411,77	15,19	2170,59	46,04	1919,68	52,28
17	7511,43	10557,59	40,55	10089,07	34,32	9968,43	32,71	9637,24	28,30	9630,96	28,22

Quadro 30 - Resultados da segunda fase de medições de raízes no sistema RoMe

(continua)

Amostra		29		30		31		32		33	
Nº	C (mm)	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%
18	2883,57	1526,40	47,07	1513,23	47,52	1406,93	51,21	1350,78	53,16	1277,17	55,71
19	11188,57	9858,34	11,89	9500,91	15,08	9492,65	15,16	9184,36	17,91	9124,81	18,45
20	2027,14	1061,58	47,63	1050,94	48,16	1059,75	47,72	1021,96	49,59	1007,47	50,30
21	7487,86	6006,98	19,78	5970,32	20,27	5876,82	21,52	5666,27	24,33	5585,25	25,41
22	1225,71	1018,44	16,91	1000,30	18,39	996,03	18,74	953,71	22,19	0,00	100,00
23	8462,14	8116,84	4,08	8136,55	3,85	8102,41	4,25	7964,14	5,89	7871,36	6,98
24	2333,57	1034,48	55,67	997,29	57,26	1004,98	56,93	956,02	59,03	958,92	58,91
25	5806,43	4736,51	18,43	4653,42	19,86	4518,37	22,18	4469,72	23,02	4303,80	25,88
26	3158,57	2226,33	29,51	2179,59	30,99	2148,33	31,98	2090,34	33,82	2028,23	35,79
27	13003,57	17651,36	35,74	17374,26	33,61	17336,27	33,32	17223,35	32,45	17135,22	31,77
28	6112,86	5238,62	14,30	5080,47	16,89	0,00	100,00	4876,32	20,23	4747,82	22,33
29	10630,71	18246,47	71,64	18158,02	70,81	18081,05	70,08	18041,08	69,71	17952,97	68,88
30	3378,57	2944,87	12,84	2758,07	18,37	2695,75	20,21	2637,81	21,93	2598,69	23,08
		ERP	33,22	ERP	33,68	ERP	36,62	ERP	35,27	ERP	37,18

Quadro 30 - Resultados da segunda fase de medições de raízes no sistema RoMe

(continua)

Amostra		35		36		37		38		39	
Nº	C (mm)	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%
1	7000,71	5232,43	25,26	4491,93	35,84	4290,80	38,71	3533,34	49,53	2966,41	57,63
2	4957,86	2156,60	56,50	2020,07	59,26	1875,77	62,17	1679,41	66,13	1612,64	67,47
3	7629,29	5622,55	26,30	4664,17	38,86	3501,92	54,10	2674,79	64,94	2076,29	72,79
4	6639,29	5030,38	24,23	4476,28	32,58	4217,80	36,47	3950,22	40,50	3416,64	48,54
5	1634,29	923,98	43,46	901,99	44,81	878,78	46,23	853,77	47,76	888,82	45,61
6	12147,14	16634,11	36,94	16708,66	37,55	16905,82	39,18	16893,98	39,08	11535,63	5,03
7	2231,43	1091,63	51,08	1084,03	51,42	1070,00	52,05	981,52	56,01	942,77	57,75
8	7401,43	5285,80	28,58	4897,56	33,83	3960,34	46,49	3148,84	57,46	2479,82	66,50
9	3087,86	1140,99	63,05	1122,64	63,64	1111,21	64,01	1047,52	66,08	995,38	67,76
10	8391,43	11047,51	31,65	10943,43	30,41	9540,69	13,70	9347,24	11,39	8810,34	4,99
11	3873,57	1775,17	54,17	1608,01	58,49	1489,53	61,55	1312,77	66,11	1258,13	67,52
12	14119,29	12123,59	14,13	12125,46	14,12	11583,25	17,96	11177,71	20,83	10605,50	24,89
13	2412,14	1054,09	56,30	1010,11	58,12	979,47	59,39	954,17	60,44	920,00	61,86
14	2459,29	1338,56	45,57	1292,68	47,44	1244,95	49,38	1253,96	49,01	1184,52	51,83
15	8147,86	5488,85	32,63	4833,34	40,68	4030,29	50,54	3713,23	54,43	3552,44	56,40
16	4022,86	1826,52	54,60	1681,11	58,21	1552,93	61,40	1393,84	65,35	1274,29	68,32
17	7511,43	9636,06	28,29	9249,71	23,14	9067,14	20,71	8919,05	18,74	8546,58	13,78

Quadro 30 - Resultados da segunda fase de medições de raízes no sistema RoMe

(conclusão)

Amostra		35		36		37		38		39	
Nº	C (mm)	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%
18	2883,57	1157,35	59,86	1074,57	62,73	1009,79	64,98	978,86	66,05	950,57	67,03
19	11188,57	8855,51	20,85	8134,07	27,30	6739,75	39,76	5037,79	54,97	3926,51	64,91
20	2027,14	978,37	51,74	971,71	52,07	945,10	53,38	921,13	54,56	903,16	55,45
21	7487,86	4275,03	42,91	3931,59	47,49	3540,86	52,71	3244,66	56,67	2887,11	61,44
22	1225,71	865,48	29,39	866,66	29,29	857,38	30,05	850,25	30,63	836,71	31,74
23	8462,14	7223,70	14,64	6812,22	19,50	5805,61	31,39	5230,48	38,19	4110,23	51,43
24	2333,57	937,52	59,82	919,09	60,61	911,64	60,93	888,23	61,94	876,74	62,43
25	5806,43	3892,60	32,96	3256,85	43,91	2882,84	50,35	2695,58	53,58	2057,85	64,56
26	3158,57	1832,73	41,98	1738,53	44,96	1410,37	55,35	1380,86	56,28	1272,61	59,71
27	13003,57	17178,81	32,11	17057,79	31,18	16862,63	29,68	16587,65	27,56	16435,45	26,39
28	6112,86	4601,57	24,72	4463,58	26,98	4352,72	28,79	4120,31	32,60	3828,92	37,36
29	10630,71	18028,33	69,59	18058,57	69,87	18015,71	69,47	18072,15	70,00	17487,42	64,50
30	3378,57	2529,58	25,13	2494,32	26,17	2498,03	26,06	2401,02	28,93	2358,34	30,20
		ERP	39,28	ERP	42,35	ERP	45,56	ERP	48,86	ERP	50,53

Fonte: O autor

APÊNDICE E - MEDIDAS DE RAÍZES NO SISTEMA TMM

Os resultados das medidas no sistema TMM para raízes de milho estão nos Quadros 31 e 32, que correspondem à primeira e segunda fase, respectivamente, descritas na metodologia, Seção 4.2.2.

Os limiares com erros percentuais médios que resultaram acima de 90% os anteriores ou posteriores, com resultado crescente a este valor não foram inclusos.

Quadro 31- Resultados da primeira fase de medições de raízes no sistema TMM

Amostra		25		34		45		56	
Nº	C (mm)	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%
1	7000,71	11896,51	69,93	10141,85	44,87	6018,40	14,03	1081,52	84,55
2	4957,86	7805,96	57,45	6581,93	32,76	3210,57	35,24	335,07	93,24
3	7629,29	12818,67	68,02	11654,75	52,76	4940,85	35,24	299,45	96,08
4	6639,29	12517,06	88,53	10608,84	59,79	6774,18	2,03	1181,52	82,20
5	1634,29	2517,78	54,06	1921,16	17,55	935,72	42,74	190,12	88,37
6	12147,14	22114,13	82,05	18318,67	50,81	11169,99	8,04	1276,74	89,49
7	2231,43	3103,79	39,09	2700,51	21,02	1391,37	37,65	120,08	94,62
8	7401,43	12209,25	64,96	10645,07	43,82	5702,06	22,96	602,02	91,87
9	3087,86	4624,81	49,77	4004,40	29,68	1899,78	38,48	310,76	89,94
10	8391,43	13837,16	64,90	12796,61	52,50	9875,01	17,68	2170,30	74,14
11	3873,57	5603,73	44,67	5023,25	29,68	3357,10	13,33	544,11	85,95
12	14119,29	23583,04	67,03	20785,82	47,22	14082,90	0,26	2864,01	79,72
13	2412,14	3685,03	52,77	3166,19	31,26	1820,01	24,55	499,89	79,28
14	2459,29	3525,92	43,37	3333,10	35,53	2187,53	11,05	508,30	79,33
15	8147,86	16358,55	100,77	13657,96	67,63	8380,33	2,85	2116,21	74,03
16	4022,86	5562,17	38,26	5034,31	25,14	2866,00	28,76	548,41	86,37
17	7511,43	16503,55	119,71	13624,86	81,39	9426,20	25,49	2138,78	71,53
18	2883,57	4404,01	52,73	3862,24	33,94	1661,04	42,40	308,91	89,29
19	11188,57	16689,12	49,16	14873,15	32,93	7778,78	30,48	1629,38	85,44
20	2027,14	2609,48	28,73	2263,01	11,64	1389,41	31,46	532,85	73,71
21	7487,86	10947,68	46,21	9697,54	29,51	5653,55	24,50	1303,39	82,59
22	1225,71	1640,85	33,87	1380,91	12,66	503,66	58,91	137,34	88,80
23	8462,14	13191,69	55,89	12430,78	46,90	6917,24	18,26	1213,71	85,66
24	2333,57	3588,91	53,79	3400,66	45,73	2569,37	10,10	867,87	62,81
25	5806,43	8804,17	51,63	8198,96	41,20	4823,02	16,94	903,84	84,43
26	3158,57	4748,47	50,34	4397,26	39,22	2730,63	13,55	529,23	83,24
27	13003,57	25115,51	93,14	20812,07	60,05	13554,66	4,24	2274,30	82,51
28	6112,86	9432,32	54,30	8403,38	37,47	5781,48	5,42	1472,08	75,92
29	10630,71	23810,21	123,98	20476,95	92,62	11961,55	12,52	1817,05	82,91
30	3378,57	30818,31	812,17	4857,22	43,77	3744,32	10,83	1010,14	70,10
		ERP	87,04	ERP	41,70	ERP	21,33	ERP	82,94

Fonte: O autor

Quadro 32 - Resultados da segunda fase de medições de raízes no sistema TMM

(continua)

Amostra		40		41		42		43		44	
Nº	C (mm)	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%
1	7000,71	8192,12	17,02	7788,08	11,25	7372,93	5,32	6920,73	1,14	6485,47	7,36
2	4957,86	5037,91	1,61	4664,97	5,91	4333,73	12,59	3974,67	19,83	3602,01	27,35
3	7629,29	8588,94	12,58	7880,86	3,30	7180,94	5,88	6504,23	14,75	5738,31	24,79
4	6639,29	9348,03	40,80	8915,66	34,29	8435,46	27,05	7881,50	18,71	7324,91	10,33
5	1634,29	1326,66	18,82	1233,26	24,54	1149,12	29,69	1076,56	34,13	998,29	38,92
6	12147,14	16000,87	31,73	15250,99	25,55	14345,99	18,10	13376,03	10,12	12322,77	1,45
7	2231,43	2061,57	7,61	1920,41	13,94	1804,09	19,15	1669,63	25,18	1522,82	31,76
8	7401,43	8728,29	17,93	8203,24	10,83	7673,99	3,68	7074,40	4,42	6420,60	13,25
9	3087,86	2827,53	8,43	2625,21	14,98	2444,30	20,84	2228,63	27,83	2070,48	32,95
10	8391,43	11869,39	41,45	11567,73	37,85	11219,40	33,70	10835,44	29,13	10383,36	23,74
11	3873,57	4530,08	16,95	4339,90	12,04	4147,79	7,08	3887,56	0,36	3627,44	6,35
12	14119,29	18398,37	30,31	17672,71	25,17	16945,23	20,01	16085,89	13,93	15146,34	7,27
13	2412,14	2558,18	6,05	2410,17	0,08	2273,14	5,76	2118,01	12,19	1966,55	18,47
14	2459,29	2911,61	18,39	2785,73	13,27	2642,75	7,46	2515,57	2,29	2359,26	4,07
15	8147,86	11479,23	40,89	10974,06	34,69	10417,50	27,86	9731,68	19,44	9074,77	11,38
16	4022,86	4223,14	4,98	3978,85	1,09	3684,84	8,40	3407,55	15,30	3145,90	21,80
17	7511,43	2798,89	62,74	11690,16	55,63	11199,42	49,10	10657,16	41,88	10078,34	34,17

Quadro 32 - Resultados da segunda fase de medições de raízes no sistema TMM

(continua)

Amostra		40		41		42		43		44	
Nº	C (mm)	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%
18	2883,57	12084,14	319,07	2526,34	12,39	2266,60	21,40	2045,36	29,07	1837,06	36,29
19	11188,57	11579,00	3,49	10892,59	2,65	10126,60	9,49	9329,02	16,62	8539,35	23,68
20	2027,14	1893,50	6,59	1795,99	11,40	1690,84	16,59	1596,54	21,24	1506,61	25,68
21	7487,86	7919,81	5,77	7508,25	0,27	7063,09	5,67	6615,55	11,65	6117,95	18,30
22	1225,71	895,94	26,91	819,26	33,16	738,66	39,74	651,27	46,87	572,12	53,32
23	8462,14	10123,36	19,63	9539,94	12,74	8940,02	5,65	8260,26	2,39	7571,61	10,52
24	2333,57	3152,26	35,08	3092,35	32,52	2984,18	27,88	2911,90	24,78	2750,10	17,85
25	5806,43	6778,58	16,74	6429,70	10,73	6043,62	4,09	5663,28	2,47	5264,98	9,32
26	3158,57	3727,43	18,01	3558,86	12,67	3368,39	6,64	3156,47	0,07	2925,19	7,39
27	13003,57	18251,30	40,36	17520,96	34,74	16703,92	28,46	15686,08	20,63	14668,70	12,81
28	6112,86	7455,48	21,96	7206,95	17,90	6910,13	13,04	6535,32	6,91	6158,34	0,74
29	10630,71	17498,44	64,60	16559,08	55,77	15569,82	46,46	14485,73	36,26	13251,10	24,65
30	3378,57	4500,63	33,21	4386,09	29,82	4254,88	25,94	4104,14	21,48	3949,67	16,90
		ERP	32,99	ERP	19,71	ERP	18,42	ERP	17,70	ERP	19,09

Quadro 32 - Resultados da segunda fase de medições de raízes no sistema TMM

(continua)

Amostra		46		47		48		49		50	
Nº	C (mm)	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%
1	7000,71	5507,32	21,33	4974,65	28,94	4453,11	36,39	3933,84	43,81	4821,81	31,12
2	4957,86	2838,49	42,75	2465,39	50,27	2121,21	57,22	1831,10	63,07	1565,30	68,43
3	7629,29	4263,29	44,12	3532,09	53,70	2885,97	62,17	2316,65	69,63	1837,93	75,91
4	6639,29	6186,21	6,82	5562,91	16,21	4940,96	25,58	4338,36	34,66	3813,89	42,56
5	1634,29	873,33	46,56	831,85	49,10	768,51	52,98	711,64	56,46	613,03	62,49
6	12147,14	9934,98	18,21	8711,81	28,28	7495,43	38,29	6388,75	47,41	5384,20	55,68
7	2231,43	1228,37	44,95	1095,71	50,90	967,10	56,66	803,81	63,98	630,85	71,73
8	7401,43	5091,31	31,21	4442,29	39,98	3825,81	48,31	3229,60	56,37	2664,69	64,00
9	3087,86	1747,73	43,40	1563,93	49,35	1377,82	55,38	1212,07	60,75	1010,06	67,29
10	8391,43	9296,26	10,78	8654,42	3,13	7924,88	5,56	7175,01	14,50	6365,19	24,15
11	3873,57	3069,98	20,75	2788,23	28,02	2479,54	35,99	2210,79	42,93	1943,33	49,83
12	14119,29	12911,19	8,56	11708,08	17,08	10505,22	25,60	9287,35	34,22	8160,58	42,20
13	2412,14	1693,16	29,81	1552,71	35,63	1423,89	40,97	1318,29	45,35	1201,42	50,19
14	2459,29	2018,07	17,94	1828,64	25,64	1683,22	31,56	1509,04	38,64	1355,23	44,89
15	8147,86	7609,79	6,60	6896,24	15,36	6196,82	23,95	5484,63	32,69	4821,81	40,82
16	4022,86	2594,63	35,50	2328,17	42,13	2062,96	48,72	1822,79	54,69	1585,16	60,60
17	7511,43	8728,27	16,20	7989,00	6,36	7168,02	4,57	6355,36	15,39	5654,30	24,72

Quadro 32 - Resultados da segunda fase de medições de raízes no sistema TMM

(conclusão)

Amostra		46		47		48		49		50	
Nº	C (mm)	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%	C (mm)	ERP C%
18	2883,57	1491,78	48,27	1353,35	53,07	1203,89	58,25	1055,23	63,41	902,85	68,69
19	11188,57	7015,14	37,30	6343,22	43,31	5583,76	50,09	4896,98	56,23	4273,80	61,80
20	2027,14	1288,75	36,43	1217,77	39,93	1139,09	43,81	1052,26	48,09	979,44	51,68
21	7487,86	5107,64	31,79	4602,59	38,53	4128,93	44,86	3663,85	51,07	3229,61	56,87
22	1225,71	448,82	63,38	389,57	68,22	353,08	71,19	320,60	73,84	284,72	76,77
23	8462,14	6230,17	26,38	5533,48	34,61	4847,62	42,71	4233,59	49,97	3670,41	56,63
24	2333,57	2440,13	4,57	2276,97	2,43	2151,02	7,82	1983,44	15,00	1841,79	21,07
25	5806,43	4412,93	24,00	4004,15	31,04	3559,95	38,69	3147,83	45,79	2753,82	52,57
26	3158,57	2530,58	19,88	2302,81	27,09	2088,90	33,87	1884,31	40,34	1646,73	47,86
27	13003,57	12367,84	4,89	11111,26	14,55	9826,91	24,43	8671,34	33,32	7505,93	42,28
28	6112,86	5381,01	11,97	4938,23	19,22	4518,83	26,08	4110,91	32,75	3657,37	40,17
29	10630,71	10684,84	0,51	9432,30	11,27	8237,23	22,51	7137,45	32,86	6049,11	43,10
30	3378,57	3569,08	5,64	3359,71	0,56	3100,25	8,24	2841,13	15,91	2553,37	24,42
		ERP	25,35	ERP	30,80	ERP	37,41	ERP	44,44	ERP	50,68

Fonte: O autor

ANEXO A – MÉTODO DE AQUISIÇÃO DAS IMAGENS DE RAÍZES

As raízes de milho utilizadas como base para as imagens são provenientes da Fazenda São José, município de Palmeira, Estado do Paraná, Brasil, coletadas no ano de 2015. De acordo com Maruyama (2016), as raízes foram armazenadas em recipientes com álcool 70% e submetidas a temperatura de $\pm 2^{\circ}\text{C}$ para evitar a ação microbiana até a realização da obtenção das imagens.

Maruyama (2016) adquiriu todas as imagens de raízes pelo escâner Epson Perfection V700 Photo com a tampa aberta, em modo colorido, profissional, formato BMP resolução 300 dpi.

Para a aquisição das imagens, Maruyama (2016) utilizou de duas bandejas de vidro e três molduras de isopor. As molduras de isopor se justificam pelo fato de evitar a incidência lateral de luz sobre as raízes, podendo ocasionar sombra na imagem (Figura 24) (NAME, 2013).

Figura 24. Escâner com as molduras de isopor e bandeja posicionada contendo amostra de uma raiz.



Fonte: Maruyama (2016)

Cada bandeja de vidro possuía 180 mm de largura, 280 mm de comprimento e 53 mm de altura de dimensões externas e 174 mm de largura, 274 mm de comprimento e 50 mm de altura de dimensões internas.

As molduras foram confeccionadas em isopor, sendo duas delas com 15 mm

de espessura, 240 mm de largura e 330 mm de comprimento, e uma com 20 mm de espessura, 240 mm de largura e 330 mm de comprimento.

Um pano umedecido com álcool etílico foi usado para a limpeza de cada bandeja antes do início do procedimento de aquisição de imagens. Encheu-se cada bandeja com uma camada de água com altura de 8 a 10 mm, as quais foram colocadas sobre o vidro do scanner Epson Perfection V700 Photo.

Em seguida, as molduras de isopor foram encaixadas na bandeja de vidro. Posteriormente, a amostra de raízes de milho foram dispostas forma aleatória na bandeja com água, tendo o cuidado para que as mesmas não encostassem nas bordas.