

MÁRIO CUPERTINO DA SILVA JÚNIOR

**MAPEAMENTO DA COBERTURA DE PLANTAS DANINHAS UTILIZANDO
IMAGENS DIGITAIS E GEOESTATÍSTICA**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2010

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e
Classificação da Biblioteca Central da UFV**

T

S586m
2010

Silva Júnior, Mário Cupertino da, 1980-
Mapeamento da cobertura de plantas daninhas utilizando
imagens digitais e geoestatística / Mário Cupertino da Silva
Júnior. – Viçosa, MG, 2010.
xv, 159f. : il. (algumas col.) ; 29cm.

Orientador: Francisco de Assis de Carvalho Pinto.
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.
Inclui bibliografia.

1. Agricultura de precisão. 2. Processamento de imagens –
Técnicas digitais. 3. Sensoriamento remoto. I. Universidade
Federal de Viçosa. II. Título.

CDD 22. ed. 631.3

MÁRIO CUPERTINO DA SILVA JÚNIOR

**MAPEAMENTO DA COBERTURA DE PLANTAS DANINHAS UTILIZANDO
IMAGENS DIGITAIS E GEOESTATÍSTICA**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

APROVADA: 30 de junho de 2010.



Prof. Paulo Marcos de Barros Monteiro



Prof. Joseph Kalil khoury Junior



Prof. Luis Manuel Navas Gracia



Prof. Jaime Gómez Gil
(Coorientador)



Prof. Francisco de Assis de Carvalho Pinto
(Orientador)

Aos meus queridos pais:

Mário Cupertino, eternamente vivo em meu coração, e Maria Rozalina,
pelo exemplo de vida, pelo incentivo, pelo amor e pela confiança.

À minha vó Paulina (*in memoriam*),

pelo exemplo de fé, pela bondade, pela força e pela luta.

Às minhas irmãs, cunhados, sobrinhos, tios, primos e a toda a minha família,
pelo carinho, pelo incentivo e pela atenção,

E aos meus grandes amigos, pela amizade sincera e eterna.

*“A mente que se abre a uma nova idéia
jamais voltará ao seu tamanho original.”*
(Albert Einstein)

*“Em todo trabalho há proveito, mas ficar só
em palavras leva à pobreza.”*
(Provérbios 14:23)

*“... não há limite para fazer livros, e o muito
estudar é enfado da carne.”*
(Eclesiastes 12:12)

AGRADECIMENTOS

A DEUS, que nos deu o dom da vida, nos preencheu com a liberdade, nos abençoou com a inteligência e nos deu força para lutarmos.

À Universidade Federal de Viçosa, através do Departamento de Engenharia Agrícola, pela oportunidade de realização do curso.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes), à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (Fapemig) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão da bolsa de estudos e pelo financiamento da presente pesquisa.

Ao professor Francisco de Assis de Carvalho Pinto, pela oportunidade do curso, pela orientação, pela amizade e pelo incentivo.

Aos professores Daniel Marçal de Queiroz, Jaime Gómez Gil e Nerilson Terra Santos, pelas valiosas sugestões, pelas colaborações e pelos conselhos.

Aos professores Luciano Baião, Ricardo Capúcio, Haroldo Fernandes, Mauri Teixeira, Renato Ruas, Darly Geraldo de Sena Júnior, Pedro Hurtado, Gílton Rodrigues e Evandro de Castro Melo, pelas contribuições e pelo apoio no dia a dia no Departamento.

Aos amigos da área de Mecanização Agrícola Antônio, Eduardo, Samuel, Sárvio, Geice, Danilo, Denis, Lorena, Selma, Marcelo, Marley, Frederico, Cleyton, Gustavo, Rafael, Amanda, Marcus (Barba), André, Robson, Paulinha, Wevergton (Gigante), Wagner (Peixe), Wagner, Flávio, Edney,

Nidilmar, Vítor, Daniel, Ronaldo, Sérgio, Diogo, Gislaine, Enrique, Murilo, Élder, Fábio Santos, Willian, Leonardo, pela amizade, pelo convívio e pelo grande auxílio na condução deste trabalho.

Ao amigo Gérson (*in memoriam*), eternamente presente em nossas lembranças, pela amizade, pela bondade e pela grande paz de espírito.

Aos professores e funcionários do DEA, pela amizade, pelo apoio e pelo convívio no dia a dia.

Aos amigos da República Gonzalo (Viçosa), Rafael, Peixe, Evan, Thiago e Bigode, e da atual república de Viçosa (Wagão e Gabriel), e a todos os amigos da UFV, PUC-MG e de Conselheiro Lafaiete, pela amizade e pelo convívio durante esses anos.

Ao Departamento de Agronomia da UFV, em especial ao professor José Eustáquio, pela concessão da área experimental e pelo auxílio na condução do experimento.

À Universidad de Valladolid, através do Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones e Ingeniería Telemática (DTSCIT) da Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación (ETSIT) no campus de Valladolid e do Departamento de Ingeniería Agrícola y Florestal (DIAF) da Escuela Técnica Superior de Ingenierías Agrarias (ETSIIAA) no campus de Palencia, pela oportunidade e pelo suporte na realização de parte deste trabalho de tese.

Aos professores Jaime Gómez Gil e Luis Manuel Navas Gracia e ao amigo Gonzalo Ruiz, pela amizade, pelo suporte, pela orientação e pelo grande auxílio no estágio realizado na Universidad de Valladolid.

Aos amigos e professores do Grupo de Telemática Industrial (GTI) e do Grupo de Investigación Reconocido de Tecnologías Avanzadas para el Desarrollo Rural Sostenible (GIR-TADRUS), da Universidad de Valladolid, pela amizade, pela acolhida e pelo apoio em todo o período do estágio.

Aos amigos da república em Valladolid João, Edson, Jose Antonio e Patrício, pela grande amizade e pelo convívio na cidade de Valladolid.

A toda a família Weiss, pelo grande carinho, pela amizade e pela acolhida em terras espanholas.

Ao colégio Mayor Belardes, por todo suporte e pela acolhida na cidade de Valladolid.

Ao CES-CL (Centro de Ensino Superior de Conselheiro Lafaiete) pela primeira oportunidade como docente, apoio e incentivo para a conclusão deste trabalho.

Ao IFMG, *campus* Ouro Preto, em especial aos professores da Coordenadoria de Automação Industrial (CODAAUT), pela oportunidade como docente, pela amizade, pela acolhida e pelo apoio no término deste trabalho.

Aos meus pais Mário Cupertino (*in memoriam*) e Maria Rozalina, pelo exemplo de amor, pela bondade, pela confiança, pela dedicação, pelo incentivo, pela amizade e pela força.

Aos meus avós, em especial à minha vó Paulina (*in memoriam*), pelo exemplo de vida a ser seguido, pela fé e pela bondade.

Às minhas irmãs, cunhados, sobrinhos, tios, primos e a toda minha família, pela atenção, pelo carinho e pelo incentivo.

Aos membros da diretoria, pela amizade sincera cultivada ao longo de muitos anos.

Aos professores e amigos do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da PUC-MG, em especial ao professor Pyramo, pela oportunidade de ingressar na carreira científica.

A todos que colaboraram, direta ou indiretamente, para que este trabalho fosse realizado.

BIOGRAFIA

MÁRIO CUPERTINO DA SILVA JÚNIOR, filho de Mário Cupertino da Silva (*in memoriam*) e Maria Rozalina Cupertino, nasceu em Conselheiro Lafaiete, MG, no dia 22 de dezembro de 1980.

Em julho de 2004, concluiu o curso de Engenharia de Controle e Automação na Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais (PUC-MG).

Em agosto de 2004, iniciou o curso de Mestrado em Engenharia Agrícola, área de concentração em Mecanização Agrícola, na Universidade Federal de Viçosa e submeteu-se à defesa de tese em setembro de 2006.

Em outubro de 2006, iniciou o curso de Doutorado em Engenharia Agrícola, área de concentração em Mecanização Agrícola, na Universidade Federal de Viçosa, submetendo-se à defesa de tese em junho de 2010.

SUMÁRIO

	Página
RESUMO	xii
ABSTRACT	x
1. INTRODUÇÃO GERAL	1
1.1. Objetivos	5
1.2. Justificativas	5
1.3. Disposição do trabalho	6
CAPÍTULO 1 – DETERMINAÇÃO DO PERCENTUAL DA COBERTURA DE PLANTAS DANINHAS UTILIZANDO IMAGENS DIGITAIS .	8
1. INTRODUÇÃO	8
2. MATERIAL E MÉTODOS	11
2.1. Aquisição dos dados	12
2.1.1. Transformação do sistema de coordenadas	12
2.1.2. Ajuste de parâmetros na tela de aquisição do SVA	14
2.2. Processamento das imagens	15
2.2.1. Transformação das imagens RGB em imagens ExG	15

	Página
2.2.2. Processo de limiarização ou binarização	17
2.2.3. Remoção de ruídos	17
2.2.4. Determinação da porcentagem da cobertura de plantas daninhas	18
2.3. Avaliação dos algoritmos de processamento de imagens	22
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	26
3.1. Aquisição dos dados	26
3.2. Processamento das imagens	29
3.2.1. Transformação das imagens RGB em ExG, limiarização e aplicação das operações morfológicas OPEN e CLOSE ...	29
3.2.2. Identificação do ângulo de inclinação das linhas de cultura nas imagens e rotação das imagens	30
3.2.3. Segmentação das linhas de cultura e cálculo da porcentagem da cobertura de plantas daninhas	32
3.3. Resultados da avaliação do processamento das imagens	40
4. CONCLUSÕES	44
5. REFERÊNCIAS	45
CAPÍTULO 2 – MAPEAMENTO DA COBERTURA DE PLANTAS DANINHAS NA CULTURA DO FEIJÃO UTILIZANDO UM SISTEMA DE VISÃO ARTIFICIAL (SVA) ACOPLADO A UM PIVÔ CENTRAL	
1. INTRODUÇÃO	47
2. MATERIAL E MÉTODOS	51
2.1. Sistema de visão artificial	51
2.2. Processamento e análise de imagens	54
2.3. Mapeamento da porcentagem de cobertura de plantas daninhas	56
2.4. Validação do sistema de visão artificial	58

	Página
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	61
3.1. Estatística descritiva	61
3.2. Análise geoestatística e construção dos mapas	65
3.3. Validação do sistema de visão artificial	74
4. CONCLUSÕES	80
5. REFERÊNCIAS	81
CAPÍTULO 3 – MAPEAMENTO DA COBERTURA DE PLANTAS DANINHAS NA CULTURA DO GIRASSOL UTILIZANDO UM SISTEMA DE VISÃO ARTIFICIAL (SVA)	84
1. INTRODUÇÃO	84
2. MATERIAL E MÉTODOS	88
2.1. Sistema de visão artificial	88
2.2. Processamento e análise de imagens	92
2.3. Mapeamento da porcentagem de cobertura de plantas daninhas	95
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	98
3.1. Estatística descritiva	98
3.2. Análise geoestatística e construção dos mapas	106
4. CONCLUSÕES	122
5. REFERÊNCIAS	123
2. CONCLUSÃO GERAL	125
REFERÊNCIAS	128
APÊNDICES	133
APÊNDICE A – Diagrama de blocos da “aquisição dos dados”	134
APÊNDICE B – Diagrama de blocos do processamento das imagens: limiarização	143

	Página
APÊNDICE C – Diagrama de blocos do processamento das imagens: identificação do ângulo de inclinação das linhas de cultura e rotação das imagens	148
APÊNDICE D – Diagrama de blocos do processamento de imagens: segmentação das linhas de cultura e cálculo do percentual da cobertura de plantas daninhas	153

RESUMO

SILVA JÚNIOR, Mário Cupertino da, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, junho de 2010. **Mapeamento da cobertura de plantas daninhas utilizando imagens digitais e geoestatística**. Orientador: Francisco de Assis de Carvalho Pinto. Coorientadores: Daniel Marçal de Queiroz, Nerilson Terra Santos e Jaime Gómez Gil.

O objetivo deste trabalho foi mapear o percentual da cobertura de plantas daninhas utilizando técnicas de processamento de imagens digitais e de geoestatística em lavouras com cultivo em linha. Para obter este mapeamento foram realizados dois experimentos. O primeiro foi conduzido em uma área experimental de 0,8 hectares, pertencente à Universidade Federal de Viçosa (UFV) na cidade de Coimbra – MG, cuja área estava sob manejo de irrigação constituído por um pivô central. A cultura implantada foi feijão, cultivar ouro vermelho, sob os sistemas de plantio direto e convencional, cada um ocupando metade da área. O segundo experimento foi conduzido em uma área de propriedade particular de aproximadamente 1,2 hectares, cultivada com girassol, sem nenhum sistema de irrigação, localizada em Aguilar de Bureba na Província de Burgos, Espanha. No primeiro estudo construiu-se um sistema de visão artificial composto por duas câmeras digitais, acopladas a estrutura móvel do pivô central, e um DGPS (Trimble Pathfinder Pro XRS). Aproveitou-se o movimento de rotação do pivô para percorrer toda a área de estudo. Uma

câmera adquiriu imagens coloridas, nas bandas do visível (RGB), e a outra adquiriu imagens na banda do infravermelho próximo (NIR). Estas câmeras capturavam as imagens simultaneamente e pertencentes à mesma cena. O DGPS capturava as coordenadas de uma posição e a esta foi assumida estar no centro da área comum das duas imagens. Estas imagens adquiridas representavam amostras da área, em uma malha regular de pontos. As imagens foram processadas para estimar a porcentagem da cobertura das plantas daninhas. De posse destes valores georreferenciados foi possível construir mapas usando técnicas de geoestatística. Os mapas gerados pelas imagens coloridas foram mais adequados, do que os das imagens NIR, para detectar a infestação de plantas daninhas, em ambos os sistemas de plantio, pois apresentaram melhor contraste entre plantas e o fundo da imagem. No segundo experimento o sistema utilizou duas câmeras digitais, com diferentes resoluções espaciais, e um GPS. Todos estes equipamentos foram acoplados em um trator, simulando a altura de um pivô central. As duas câmeras capturavam imagens coloridas da mesma cena e na mesma altura, mas com resoluções espaciais diferentes. Assumiu-se novamente que as coordenadas capturadas pelo GPS eram as do centro das imagens. As amostras da área pelas imagens foram adquiridas em uma malha regular de pontos, com as câmeras posicionadas a 3 e 4 m de altura, aos 37 e 46 dias após o plantio (DAP). As imagens foram processadas para estimativa da infestação de plantas daninhas para cada posição. Logo, os mapas referentes aos tipos de câmeras, alturas de posicionamento das câmeras e estádios de crescimento da cultura foram construídos pelo sistema desenvolvido. A câmera de maior resolução apresentou melhor desempenho para mapear a porcentagem da cobertura de plantas daninhas e identificar a variabilidade de infestação destas plantas na área de estudo, em ambas as alturas e estádios de crescimento da cultura avaliados, pois apresentaram melhor contraste entre plantas e solo do que às imagens da outra câmera. Os mapas nos dois estádios de crescimento apresentaram similaridade para ambas as alturas e câmeras testadas.

ABSTRACT

SILVA JÚNIOR, Mário Cupertino da, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, June, 2010. **Mapping of weed cover using digital images and geostatistics**. Adviser: Francisco de Assis de Carvalho Pinto. Co-advisers: Daniel Marçal de Queiroz, Nerilson Terra Santos and Jaime Gómez Gil.

The objective of this study was to map weed percent coverage using techniques of digital image processing and geostatistics in row crops. Two experiments were performed. The first was conducted in a 0.8 hectare experimental area belonging to the Universidade Federal de Viçosa (UFV) in the city of Coimbra, MG, Brazil, whose area was irrigated with a central pivot system. The area was planted with common beans, Ouro Vermelho cultivar, where half of the area was crop in tillage system and the other half in no-tillage. The second experiment was conducted on a private property of approximately 1.2 hectares cultivated with sunflower, with no irrigation system, located in Aguilar de Bureba, Burgos province, Spain. In the first study, a machine vision system was built, with two digital cameras and a DGPS (Trimble Pathfinder Pro XRS) set up on the central pivot structure. The central pivot moved to sample the entire area of study. One camera acquired color images in the visible bands (RGB), and the other acquired images in the near infrared band (NIR). These cameras captured images simultaneously of the same scene. The scene

coordinates were acquired by the DGPS, and it was assumed to be in the center of the common area of the two images. These images were acquired in a grid pattern. The images were processed for the percentage of weed cover estimation. Once it was acquired all the georeferenced weed percentage values, it was possible to construct maps using geostatistical techniques. The system performance was access for the two cameras and for the two tillage systems. The maps generated by using color images were more reliable than those using NIR images for weed infestation detection in both tillage systems since they presented a better contrast between plants and background. In the second experiment, the system used two different digital color cameras, with different image resolutions, and a GPS. All equipments were set on a tractor, simulating height of a central pivot. The two cameras captured color images of the same scene and at the same height, but with different spatial resolutions. It was again assumed that the GPS coordinates referred to the image center. Sample images of the area were acquired in a grid pattern at camera heights of 3 and 4 m, and at 37 and 46 days after planting (DAP). The images were processed for weeds infestation estimation for each position. Thus, maps for camera, height and date were built by the developed system. The higher resolution camera was presented better performance to map the percentage of weed coverage and identify variability of these plants in the area under study, at both heights and growth stages since it presented better contrast between plants and soil than the other camera. The maps at both stages of growth presented similarity for both tested heights and cameras.

1. INTRODUÇÃO GERAL

O Brasil possui atualmente cerca de 388 milhões de hectares de terras agricultáveis férteis, dos quais 90 milhões ainda não foram explorados e ainda possui um clima favorável à agricultura que possibilita mais de uma safra por ano. Além disso, o país possui grande disponibilidade de água, de produtores e de agroindústrias. Esses fatores contribuem para o Brasil ser um dos líderes mundiais na produção e exportação de vários produtos agropecuários, sendo o primeiro produtor e exportador de café, açúcar, álcool e sucos de frutas (BRASIL, 2009).

De acordo com a Companhia Nacional de Abastecimento – CONAB (2009), se as condições climáticas forem favoráveis durante todo o ciclo das culturas, a produção brasileira de grãos para a safra 2009/10, poderá atingir um volume entre 139,04 e 141,7 milhões de toneladas que representa um aumento entre 3% e 5%, ou seja, 4,05 e 6,7 milhões de toneladas, superior ao total produzido em 2008/09 que foi de 135 milhões de toneladas.

Existem diversos fatores que podem prejudicar o crescimento da produção agrícola e a infestação de plantas daninhas é um deles, pois interfere no desenvolvimento das culturas, competindo com estas por nutrientes, água e luz, além de poder hospedar pragas e doenças. Em geral, a infestação de plantas daninhas é representada por muitas espécies, emergindo em épocas diferentes, o que dificulta o seu controle; ao contrário dos ataques de pragas e

doenças, ocasionados normalmente por uma ou poucas espécies (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA, 2009).

Para o controle das plantas daninhas o método mais utilizado é o químico, ou seja, o uso de herbicidas, tendo como vantagens a economia de mão-de-obra e a rapidez na aplicação. Silva e Silva (2007) confirmam este fato, pois citam que o elevado custo de mão-de-obra no campo tem obrigado os produtores a optar por tecnologias que demandam menos este insumo e com isso o uso de herbicidas se tornou uma prática indispensável.

Segundo a Associação Brasileira das Indústrias de Química Fina, Biotecnologia e suas Especialidades – ABIFINA (2010), o mercado brasileiro de defensivos agrícolas vem crescendo nos últimos anos, atingindo US\$ 7,1 bilhões em 2008, com alta de 30% em relação a 2007 que foi de US\$ 5,4 bilhões, colocando o país na liderança do consumo mundial de agroquímicos. Por outro lado, a aplicação convencional de herbicidas pulveriza o produto químico uniformemente por toda a área, o que leva à deposição de produtos químicos fora do alvo, onde não há plantas daninhas, gerando perdas e agredindo o meio ambiente, causando grandes preocupações.

A variabilidade espacial das plantas daninhas nas áreas de cultivo ocorre, em geral, devido a estas serem, na maioria das vezes, formadas por reboleiras e de forma não-homogênea. Diante disso, para que a aplicação dos herbicidas seja segura, eficiente e econômica é necessário o desenvolvimento e uso de tecnologias que permitam a redução do volume de agrotóxicos aplicados, utilizando a quantidade certa, no momento certo e no lugar certo. A modernização dos equipamentos de aplicação, com o uso de tecnologia embarcada, para a aplicação localizada pode contribuir e atender significativamente estes objetivos. Baio (2001), utilizando um sistema para aplicação localizada de defensivos agrícolas, verificou uma economia de 31,6% de herbicida, quando comparado à aplicação em área total.

O mapeamento da infestação de plantas daninhas torna-se uma ferramenta útil para a aplicação localizada de herbicida, informando a localização, a sua distribuição ao longo de toda a área e podendo até prescrever a quantidade e volume de defensivo necessário, gerando a redução do risco de poluição ambiental e do custo dos herbicidas aos agricultores

(SCHUSTER *et al.*, 2007). Esta ferramenta está inserida na filosofia da agricultura de precisão que, segundo Stafford (2000), pode ser definida como um grupo de tecnologias e procedimentos utilizados para aperfeiçoar os sistemas de produção, tendo como elemento chave o gerenciamento da variabilidade espacial da produção e os fatores a ela relacionados.

A agricultura de precisão pode oferecer benefícios na produtividade, no lucro, na sustentabilidade, na qualidade, na proteção ambiental, na qualidade de vida e no desenvolvimento econômico da agricultura (ROBERT, 2002). De acordo com Tschiedel e Ferreira (2002), a adoção da agricultura de precisão vem crescendo com a evolução da informática, de tecnologias em geoprocessamento, sistemas de posicionamento global, dentre outras tecnologias, proporcionando ao sistema de produção agrícola uma nova forma de administrar. Os autores afirmam que esta mudança é necessária para que se entenda que a propriedade não é homogênea e que se trate cada parte conforme suas necessidades; fazendo com que o produtor tenha o conhecimento de cada metro quadrado da sua propriedade.

Segundo a Associação Nacional de Defesa Vegetal – ANDEF (2010), entre os resultados concretos da inovação nas últimas décadas, destacam-se a redução de doses de defensivos agrícolas e os resultados são positivos quando o uso destes produtos se alia às técnicas como a agricultura de precisão.

O mapeamento de plantas daninhas pode ser obtido utilizando diversas técnicas. De acordo com Lamb e Brown (2001), o uso das técnicas de sensoriamento remoto vem se destacando na identificação e mapeamento de plantas daninhas nas culturas. Os autores afirmam que uma das principais vantagens destas técnicas é a extração de informações por imagens digitais, podendo estas ser adquiridas praticamente de forma instantânea e gerando rapidamente um preciso mapa de plantas daninhas. Diversos outros estudos demonstraram a utilidade das técnicas de sensoriamento remoto para mapeamento de plantas daninhas (CHRISTENSEN *et al.*, 1993; GOEL *et al.*, 2003; SCHUSTER *et al.*, 2007; SUI *et al.*, 2008).

As tecnologias de sensoriamento remoto e agricultura de precisão estão desenvolvendo progressivamente e atingindo um importante papel na

produção agrícola. O potencial das imagens de alta resolução espacial e espectral pode fornecer informações detalhadas sobre as condições dos campos agrícolas e com isso podem ser utilizadas para monitorar o crescimento das culturas, a produtividade, as condições do solo a intensidade e a distribuição de plantas daninhas entre outras funções (SUI *et al.*, 2008).

Sistemas utilizando câmeras digitais e processamento de imagens, também chamados de sistemas de visão artificial, são ferramentas constituintes das técnicas de sensoriamento remoto. Estes sistemas podem atuar no mapeamento capturando imagens que retratam toda a área de estudo ou imagens que representam apenas amostras da área. Entretanto, para construir mapas por meio apenas de amostras da área, é necessário utilizar ferramentas capazes de atribuir valores aonde não se capturou informações. Estas ferramentas fazem uso da estatística espacial, a qual interpola valores onde não se conhece, baseando-se nos valores da vizinhança.

A estatística espacial e especificamente a geoestatística compreendem um conjunto de técnicas utilizadas para analisar e prever os valores de uma variável distribuída no espaço, ou seja, descobrir a variabilidade espacial dos dados. Um modelo pode ser construído para explicar os dados amostrados, com os valores adquiridos pelas amostras. Assim, com um modelo apropriado ajustado é possível estimar os valores de pontos não amostrados usando diferentes métodos de interpolação, sendo que a qualidade dos valores estimados depende do método de interpolação escolhido.

Portanto, calculando o percentual da área coberta pelas plantas daninhas por meio da amostragem georreferenciada e aplicando estes valores na estatística espacial, modelos que confirmam a dependência espacial podem ser ajustados e mapas com classes de porcentagem de cobertura das plantas daninhas podem ser gerados. A partir desses mapas é possível identificar a variabilidade da infestação das plantas daninhas e isso pode ser usado na tomada de decisões das práticas agrícolas de aplicação localizada.

O presente trabalho tem como hipótese a existência da dependência e variabilidade espacial do percentual da cobertura de plantas daninhas ao longo das áreas agrícolas e que estas podem ser obtidas por meio de processamento de imagens digitais e de estatística espacial.

1.1. Objetivos

Este trabalho foi realizado com o objetivo de desenvolver um sistema de visão artificial (SVA) para mapear a cobertura de plantas daninhas utilizando técnicas de processamento de imagens digitais e estatística espacial.

Especificamente, pretende-se:

- Desenvolver algoritmos do SVA para capturar, georreferenciar e processar imagens, com o objetivo de calcular o percentual da cobertura de plantas daninhas nas entrelinhas;
- Construir mapas com classes do percentual da cobertura de plantas daninhas nas entrelinhas utilizando técnicas de estatística espacial;
- Comparar diferentes tipos de câmeras e diferentes sistemas de plantio (convencional e direto) no mapeamento da cobertura de plantas daninhas;
- Avaliar a influência da altura, no posicionamento das câmeras do SVA, e de diferentes estádios de crescimento da cultura no mapeamento da cobertura das plantas daninhas;
- Testar o SVA para efetuar o mapeamento da cobertura de plantas daninhas.

1.2. Justificativas

O Brasil vem apresentando ao longo dos anos crescimento em sua produção agrícola, fruto de investimentos neste setor, o que o tem levado o país a ter uma posição de destaque na produção e exportação de vários produtos agropecuários. Uma série de fatores favorece este crescimento dentre eles o clima, que possibilita duas ou mais safras por ano, a existência de grandes extensões de áreas agricultáveis e a disponibilidade de água. E para que o crescimento deste setor continue é necessário sempre buscar a otimização da produção, diminuindo gastos e melhorando a qualidade dos produtos para atender a exigências do mercado que está cada vez mais seletivo e competitivo.

Boa parte do custo da produção agrícola no país se refere a gastos para o controle de plantas daninhas, o que faz do país um dos maiores consumidores de defensivos agrícolas do mundo. A aplicação convencional de

defensivos ocorre de forma uniforme, independente da quantidade de plantas daninhas existentes ao longo de toda a área. Isso promove o uso inadequado e excessivo dos defensivos, além de gerar gastos desnecessários na produção podendo afetar na qualidade do produto e agredir o meio ambiente. Sendo assim, o ideal é utilizar a quantidade certa de produto químico e aplicá-lo somente onde há ocorrência de plantas daninhas. Vários estudos comprovam que a aplicação adequada e localizada de defensivos proporciona economia sem prejudicar o controle das plantas daninhas. Uma forma de efetuar a aplicação localizada é com base em informações da variabilidade espacial da infestação das plantas daninhas por toda área por meio de mapas.

O mapeamento pode ser realizado por diversas técnicas e ferramentas, entretanto uma das mais promissoras é a técnica de sensoriamento remoto, por meio de imagens digitais, pois podem adquirir várias informações sem ter contato físico, com auxílio das técnicas de estatística espacial para a atribuição de valores em áreas não amostradas. Inclusive, com estas técnicas e utilizando as mesmas imagens, podem-se ser obtidos o mapeamento do *status* nutricional da cultura, de doenças e pragas presentes na lavoura dentre outros problemas e características. Estas informações contidas nos mapas serão importantes na tomada de decisões futuras para a obtenção da otimização do sistema produtivo, além de proporcionar um controle e histórico da área, favorecendo um gerenciamento lucrativo e responsável da lavoura.

1.3. Disposição do trabalho

Este trabalho está dividido em três capítulos. Inicialmente, é apresentada uma introdução do presente trabalho e uma breve descrição da sua importância, dos objetivos e dos tópicos abordados em cada capítulo.

No capítulo 1, é apresentado o desenvolvimento do sistema de visão artificial (SVA) construído, com os algoritmos desenvolvidos para a aquisição das imagens e das coordenadas pelo GPS e os algoritmos que efetuavam o processamento das imagens para o cálculo do percentual da cobertura vegetal das plantas daninhas. A tela da interface com o usuário com as opções do SVA também são apresentadas e detalhadas.

O capítulo 2 descreve o processo para o mapeamento do percentual da cobertura das plantas daninhas utilizando imagens digitais e técnicas de geoestatística, em uma área de aproximadamente 1 hectare, cultivado com feijão, sob manejo de irrigação constituído por um pivô central. Em metade da área trabalhada a cultura foi implantada sob o sistema de plantio direto e na outra metade sob o sistema de plantio convencional. Acoplaram-se as câmeras digitais na estrutura do pivô central e usou-se o movimento de rotação deste para percorrer toda a área de estudo. O SVA construído efetuou o processamento das imagens e cálculo do percentual da cobertura das plantas daninhas, já os mapas foram construídos com auxílio da geoestatística pelo *software* GS+. O efeito da diferença de sistema de plantio e dos tipos de câmeras utilizadas foi analisado neste mapeamento.

No capítulo 3, um outro estudo é apresentado onde acoplou-se duas câmeras e um GPS em uma pá acoplada a um trator, simulando a altura do pivô central, e este percorreu por uma área de 1,2 hectares, cultivada por girassol, sob o sistema de plantio convencional capturando imagens e coordenadas para efetuar o mapeamento da cobertura vegetal das plantas daninhas. O SVA efetuou o processamento das imagens e o cálculo do percentual da cobertura das plantas daninhas, e os mapas foram construídos utilizando o *software* GS+ de geoestatística. Avaliou-se o uso de diferentes câmeras em diferentes alturas de posicionamento e em diferentes estádios de crescimento da cultura no mapeamento.

Para finalizar, é apresentada uma visão geral do trabalho, o qual foi exposto e descrito detalhadamente nos capítulos anteriores, bem como uma conclusão geral sobre os resultados obtidos em cada capítulo abordado neste trabalho.

CAPÍTULO 1

DETERMINAÇÃO DO PERCENTUAL DA COBERTURA DE PLANTAS DANINHAS UTILIZANDO IMAGENS DIGITAIS

1. INTRODUÇÃO

O surgimento de plantas indesejadas nas áreas agrícolas pode acarretar diversos problemas sobre as plantas cultivadas, interferindo não só na produtividade, mas também em todo o sistema de produção agrícola (BAIO, 2001). Estudos mostram que as plantas jovens da maioria das culturas são sensíveis à interferência de plantas daninhas, devido à forte competição por nutrientes existente entre as plantas (PITELLI, 1987; RONCHI *et al.*, 2003), além da competição por luz. Com isso, é importante o controle das plantas daninhas, pois estas provavelmente consumirão nutrientes essenciais ao crescimento e desenvolvimento da cultura implantada podendo afetar na sua qualidade e produtividade.

Segundo a Agência das Nações Unidas para a Agricultura e a Alimentação (FAO), as plantas daninhas são consideradas o inimigo número um dos agricultores. O prejuízo que elas causam às lavouras no mundo chega a US\$ 95 bilhões por ano, com quebra da produção. Para a FAO, se os agricultores quiserem aumentar a produtividade de suas lavouras, a primeira

coisa a fazer é melhorar a luta contra as ervas daninhas (FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS – FAO, 2010).

Um dos meios mais eficazes para se combater o crescimento de plantas daninhas é efetuando a aplicação de herbicidas. A aplicação convencional, seja ela executada por pulverizadores autopropelidos ou por equipamentos acionados por trator, promove a aplicação a uma taxa uniforme de herbicida em toda a área, ocorrendo a deposição de produtos químicos onde não existe incidência das plantas daninhas. Isto, além de gerar gastos desnecessários, prejudica o meio ambiente, contaminando-o. Assim, utilizar a quantidade certa de produto químico e aplicá-lo somente onde há ocorrência de plantas daninhas pode auxiliar os agricultores na otimização de sua produção, melhorando a qualidade de seus produtos e reduzindo futuros problemas ambientais.

Atualmente existe uma clara tendência para a diminuição do uso de produtos químicos na agricultura, tanto devido a questões ambientais quanto para redução de custos. Tecnologias têm sido desenvolvidas para tornar os produtos agrícolas mais seguros e diminuir seus impactos negativos sobre o meio ambiente e, com isso, a agricultura de precisão surge como uma valiosa ferramenta para alcançar esta meta (TELLAECHE *et al.*, 2008). A agricultura de precisão, segundo Molin (2000), pode ser definida como um elenco de tecnologias e procedimentos utilizados para que os sistemas de produção agrícolas sejam otimizados, tendo como elemento chave, o gerenciamento da variabilidade espacial da produção e os fatores a ela relacionados.

Segundo Shiratsuchi (2001), informações da variabilidade espacial de fatores como fertilidades, umidade, produtividade, pragas, doenças, plantas daninhas, etc. devem ser analisadas com um nível maior de detalhamento para a racionalização e otimização das práticas de manejo agrícolas.

Na agricultura, a utilização de sistemas de visão artificial tem-se tornado interessante, principalmente para reduzir aplicação localizada de herbicidas, onde sistemas de controle de plantas daninhas baseado em visão estão sendo desenvolvidos para pulverizar especificamente em tempo real áreas infestadas (GÉE *et al.*, 2008).

Técnicas de sensoriamento remoto e de processamento digital de imagens podem ser utilizadas para calcular o percentual de cobertura de plantas daninhas. Este cálculo pode tornar-se uma ferramenta útil para informar regiões de alta incidência de plantas, bem como regiões de ausência, e auxiliar na aplicação localizada de herbicidas. Entretanto, pode ser que dependendo da localização das câmeras e do tamanho da área retratada pelas imagens, seja difícil imagear toda a área. Logo, surge como solução, o uso de amostras da área e a construção de mapas do percentual da infestação, com o auxílio de técnicas de estatística espacial.

O objetivo do presente trabalho foi desenvolver algoritmos para capturar imagens georreferenciadas e determinar o percentual da cobertura de plantas daninhas.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Algoritmos com as funções de adquirir imagens e coordenadas de GPS simultaneamente e automaticamente, além de efetuar o processamento e análise das imagens foram implementados no *software* LabView, versão 8.6, da *National Instruments*. Estes algoritmos foram desenvolvidos por meio de uma parceria entre o laboratório PROVISAGRO (Projeto de Máquina e Visão Artificial na Agricultura) do Departamento de Engenharia Agrícola (DEA) da Universidade Federal de Viçosa e o *Grupo de Investigación Reconocido de Tecnologías Avanzadas para el Desarrollo Rural Sostenible (GIR-TADRUS)* do Departamento de Ingeniería Agrícola y Florestal (DIAF) da Escuela Técnica Superior de Ingenierías Agrarias (ETSIIAA) da Universidad de Valladolid, campus de Palencia.

O *software* LabView é composto de duas partes, o painel de controle e o diagrama de blocos. No painel de controle, localizam-se os botões de controle, acionamento e de ajustes e também os campos de visualização dos resultados e das imagens, os gráficos e indicadores, entre outros. No diagrama de blocos, desenvolvem-se os algoritmos, os quais são construídos por meio do fluxo de dados entre blocos. Este fluxo de dados ocorre sempre da esquerda para a direita. Os diagramas de blocos do sistema desenvolvido estão apresentados nos Apêndices A e D.

Os algoritmos foram divididos em duas partes, de “Aquisição dos dados” e a de “Processamento das imagens”, sendo que a primeira foi dividida em transformação dos sistemas de coordenadas e ajuste de parâmetros na tela de aquisição dos dados. A segunda parte foi dividida em três tópicos, que começou pela transformação das imagens coloridas em imagem índice, em seguida o processo de limiarização junto com a eliminação de ruídos nas imagens, e por fim a identificação das linhas de cultura e cálculo da porcentagem da cobertura de plantas daninhas.

2.1. Aquisição dos dados

O algoritmo desta parte promovia a captura automática e simultânea de duas imagens, coloridas e/ou monocromáticas, e as coordenadas geográficas de um ponto. Estas imagens retratavam a mesma cena e as coordenadas geográficas eram referentes ao ponto central da área comum a estas duas imagens.

O receptor GPS recebia informação dos satélites e as transmitia para o microcomputador, em um formato padronizado pelos fabricantes, ou seja, um protocolo. No presente trabalho o sistema proposto foi preparado para trabalhar com o protocolo NMEA (0183). Este protocolo possui várias sentenças de informações, entretanto utilizou-se somente a sentença RMC (*Recommended Minimum Specific GPS/TRANSIT Data*) que continha todos os dados necessários: latitude, hemisfério Norte ou Sul, longitude, hemisfério Leste ou Oeste e velocidade.

2.1.1. Transformação do sistema de coordenadas

As coordenadas capturadas estavam em latitude e longitude, entretanto, para possibilitar a construção futura de mapas em um plano cartesiano, implementou-se no sistema uma função para converter o sistema de coordenadas geográficas, em graus, para UTM (Projeção Universal Transversal de Mercator), em metros. Para efetuar essa conversão utilizaram-

se as equações de Coticchia-Surace, de acordo com Espinosa *et al.* (2007), as quais são baseadas no elipsoide do *datum* WGS84.

Para iniciar o processo de transformação, foi necessário calcular alguns parâmetros do elipsoide como a segunda excentricidade (e') e o raio polar de curvatura (c), representados respectivamente pelas equações 1 e 2.

$$e' = \frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{a} \quad (1)$$

$$c = \frac{a^2}{b} \quad (2)$$

em que “a” refere-se ao tamanho do semieixo maior da terra no elipsoide WGS84 e tem valor igual a 6.378.388 metros; e “b”, ao tamanho do semieixo menor da terra neste elipsoide e tem valor igual a 6.356.911,94613 metros.

Outro parâmetro calculado foi o fuso da projeção UTM que as coordenadas pertencem, conforme a equação 3. O valor do fuso é um número inteiro entre 1 e 60, pois nesta projeção, a Terra é dividida em 60 fusos, sendo que cada fuso possui 6° de longitude.

$$\text{fuso} = \left(\frac{\lambda}{6} + 31 \right) \quad (3)$$

em que λ é o valor em graus decimais da longitude (este valor tem sinal positivo se a coordenada estiver localizada no hemisfério leste e sinal negativo se estiver no hemisfério oeste). O valor final do fuso utilizado na equação 4 é o valor arredondado para o número inteiro mais próximo.

O próximo passo foi obter o meridiano central do fuso (λ_0), que é a linha que passa verticalmente no meio do fuso. Este meridiano é calculado de acordo com a equação 4.

$$\lambda_0 = (6 \text{ fuso}) - 183 \quad (4)$$

O último parâmetro calculado antes da utilização das equações de Coticchia-Surace foi a distância angular ($\Delta\lambda$), em radianos, entre a longitude do ponto (λ) e o meridiano central do fuso (λ_0) conforme a equação 5.

$$\Delta\lambda = \frac{(\lambda - \lambda_0)\pi}{180} \quad (5)$$

As equações de Coticchia-Surace são utilizadas para calcular as coordenadas UTM X e Y de acordo com as equações 6 e 7.

$$X = \zeta v \left(1 + \frac{\xi}{3}\right) + 500.000 \quad (6)$$

$$Y = \eta v(1 + \xi) + B_\phi \quad (7)$$

em que os parâmetros ζ , v , ξ , η e B_ϕ foram calculados segundo as equações do diagrama de blocos da Figura 1, sendo que “ ϕ ” é o valor da latitude em radianos. No hemisfério sul é necessário adicionar o valor 10.000.000 ao resultado de “Y”.

2.1.2. Ajuste de parâmetros na tela de aquisição do SVA

Para iniciar o funcionamento do sistema, foi necessário ajustar alguns parâmetros para os dados poderem ser adquiridos no tempo e espaçamento desejados e proporcionar imagens de melhor qualidade. Esses parâmetros são a distância entre os pontos capturados e o tempo de exposição do sensor à luz pelo obturador eletrônico (*electronic shutter*). A distância entre pontos ajustada era comparada com a distância calculada a partir do GPS, por meio da velocidade de deslocamento. A velocidade de deslocamento era um dado recebido junto com as coordenadas, e tinha seu valor atualizado a cada segundo. Portanto, de posse do valor do tempo decorrido e da velocidade de deslocamento, calculava-se a distância entre pontos, e quando esta era igual ao valor da distância ajustada capturava-se as imagens e as coordenadas. Já o obturador eletrônico podia ser definido manualmente, atribuindo um valor a esse parâmetro e avaliando visualmente a qualidade da imagem capturada, ou automaticamente mediante o cálculo da quantidade de *pixels* saturados com valores de 255, e verificação da faixa aceitável para essa quantidade, definida pela observação das imagens em testes preliminares. Portanto, ao capturar as imagens, calculava-se a quantidade de *pixels* com valor 255 e verificava se o

valor pertencia à faixa desejável, caso contrário aumentava ou diminuía o valor do tempo de exposição à luz.

2.2. Processamento das imagens

2.2.1. Transformação das imagens RGB em imagens ExG

Após a aquisição, as imagens foram transformadas do espaço RGB em imagens índice monocromática, para aumentar o contraste entre as plantas e o solo de fundo, ou seja, destacar a vegetação dos outros elementos da cena (solo, pedras, palha, etc.). Para cada *pixel* das imagens índice foi atribuído um valor definido pelo índice excesso de verde (ExG) utilizando as bandas R, G e B de acordo com Woebbecke *et al.* (1995). Este índice foi calculado por meio da equação 8.

$$ExG = 2g - r - b \quad (8)$$

em que, r , g e b são os valores digitais normalizados de R, G e B, respectivamente, de acordo com as equações 9, 10 e 11.

$$r = \frac{R}{R + G + B} \quad (9)$$

$$g = \frac{G}{R + G + B} \quad (10)$$

$$b = \frac{B}{R + G + B} \quad (11)$$

em que R, G e B são os valores digitais de cada *pixel* das imagens coloridas nas bandas vermelho, verde e azul, respectivamente.

As imagens NIR, como são monocromáticas, não passaram por essa etapa de transformação, portanto foram limiarizadas diretamente.

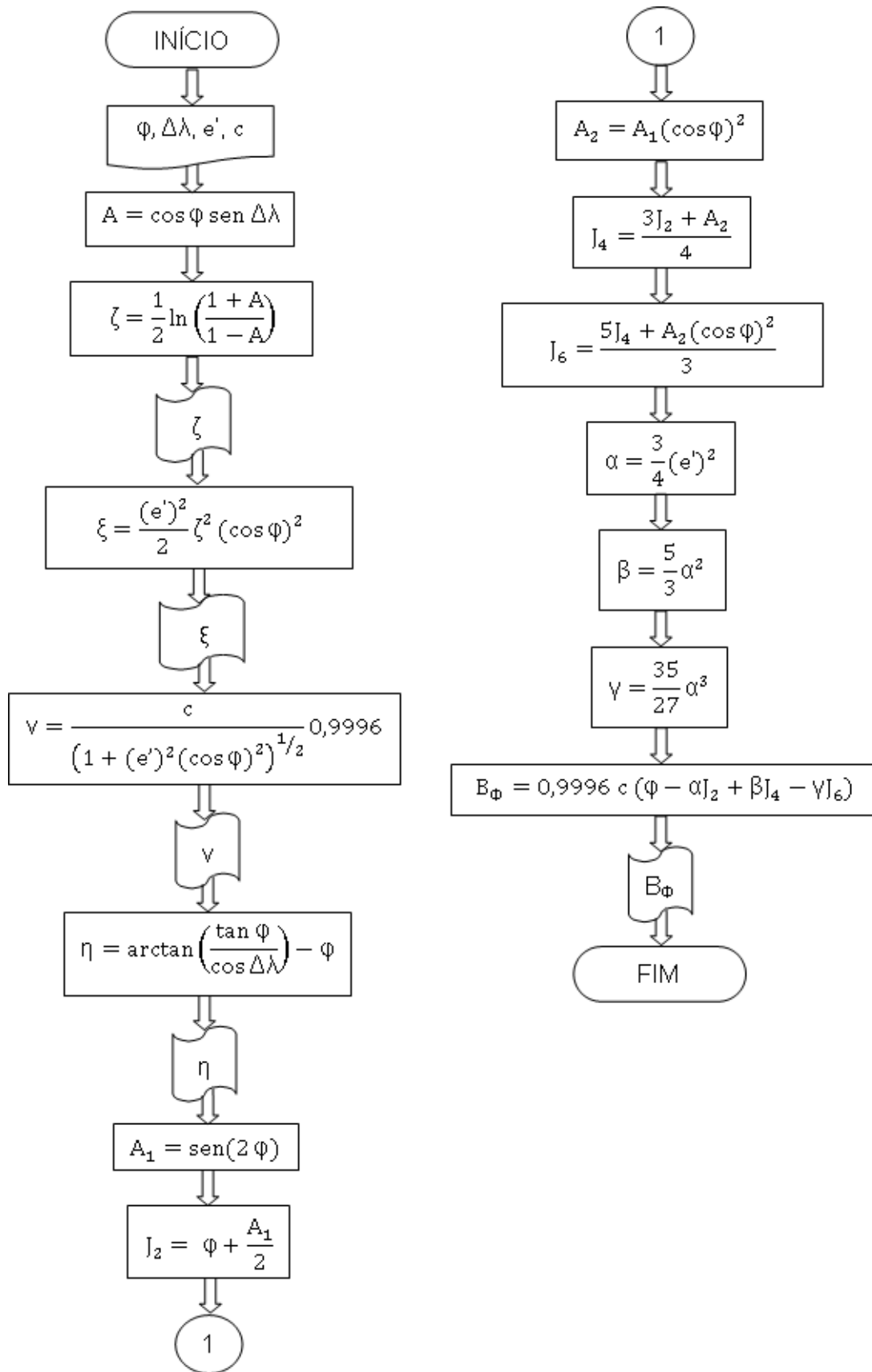


Figura 1 – Diagrama de blocos das equações que descrevem os parâmetros ζ , v , ξ , η e B_ϕ .

2.2.2. Processo de limiarização ou binarização

Em seguida foi realizado o processo de limiarização das imagens índice e nas imagens infravermelho próximo (NIR). Assim, para cada imagem, por meio do seu histograma, foi obtido um limiar T para o valor do *pixel*, calculado pelo método automático de limiarização iterativo apresentado por Yang *et al.* (2001), que segmentou a imagem em duas classes, plantas (planta daninha e cultura) e solo (resto da imagem). Este método iterativo assume que o valor do limiar ótimo é a média dos valores médios dos *pixels* das duas classes de um histograma bimodal.

Cada *pixel* que teve valor digital maior que o limiar T foi rotulado com o valor 255 (cor branca), os quais correspondiam à classe das plantas (daninhas e cultura), já os *pixels* que tiveram valor digital menor que o limiar T adquiriram o valor digital 0 (cor preta), correspondendo à classe solo e outros (pedras, palha, etc.).

2.2.3. Remoção de ruídos

Após a obtenção das imagens limiarizadas (binárias) utilizou-se as operações morfológicas OPEN e CLOSE fornecidas pelo LabView para atuar como filtros e remover os ruídos presentes nas imagens. Estas operações são referentes à abertura e fechamento das imagens, respectivamente. A operação de abertura consiste na aplicação sucessiva das operações de erosão e de dilatação e tem como resultado a eliminação de pontos isolados, ou seja, pequenos objetos podem desaparecer ou serem divididos. Já a operação de fechamento consiste na aplicação sucessiva das operações de dilatação e de erosão, promovendo a eliminação de espaços isolados, resultando no preenchimento de pequenos buracos, podendo unir objetos próximos. A aplicação consecutiva destas duas operações de abertura e fechamento faz com que os ruídos sejam eliminados sem a alteração do tamanho dos objetos.

A erosão e a dilatação são operações orientadas pela vizinhança. A vizinhança, neste caso, é definida por uma pequena imagem binária, denominada elemento estruturante, que percorre a imagem de entrada,

preservando ou invertendo o *pixel* central da vizinhança, na imagem de saída, em função de seus vizinhos.

Para efetuar estas duas operações utilizou-se um elemento estruturante de dimensão 3 x 3. O centro deste elemento percorria *pixel* a *pixel* da imagem, e os oito *pixels* ao redor definia a alteração ou não do *pixel* central. Na dilatação, para cada *pixel* preto (fundo) posicionado no centro do elemento estruturante, na imagem binária de entrada, se houver pelo menos um vizinho branco (objeto), o *pixel* central é invertido na imagem de saída. Assim, os objetos crescem em área, podendo até se unir, e o fundo e os buracos nos objetos diminuem, sendo até mesmo eliminados. Na erosão, para cada *pixel* branco (objeto) posicionado no centro do elemento estruturante, na imagem binária de entrada, se houver pelo menos um vizinho preto (fundo), o *pixel* é invertido na imagem de saída. De modo que os objetos diminuam ou sejam eliminados, crescendo o fundo e os buracos (GOMES, 2001).

2.2.4. Determinação da porcentagem da cobertura de plantas daninhas

Para efetuar a determinação da porcentagem da cobertura de plantas daninhas, primeiramente, criou-se uma função que identificava o ângulo de inclinação das linhas de cultura nas imagens limiarizadas, utilizando a transformada de Hough. Isto foi necessário, pois dependendo da movimentação das câmeras em relação às linhas de cultura, estas podem estar em diversas direções nas imagens. Segundo Gée *et al.* (2008), dentre os principais algoritmos de detecção de linhas em imagens digitais esta técnica é considerada como uma das mais robustas.

Para a aplicação da transformada de Hough, foi utilizada a metodologia proposta por Duda e Hart (1972), os quais utilizaram o sistema de coordenadas polares para representação de uma linha reta, sendo esta parametrizada pela distância perpendicular (ρ) da origem à reta no plano x-y (plano da imagem), e pelo ângulo (θ) com a normal (eixo x) (Figura 2). Assim todo ponto (x, y) de uma reta satisfaz a equação 12.

$$x \cos \theta + y \sin \theta = \rho \quad (12)$$

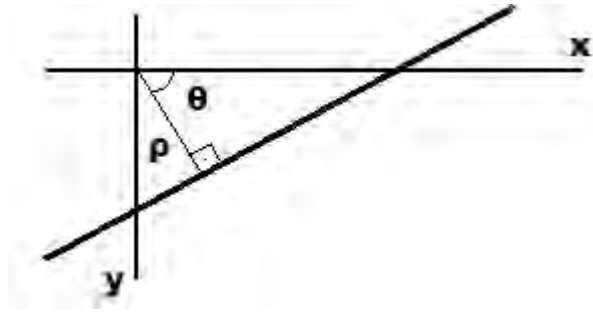


Figura 2 – Representação dos parâmetros de uma equação de reta em coordenada polar.

O princípio desta técnica é a transformação dos pontos que representam objetos (*pixels* diferente de zero) do plano original x - y da imagem binária para o plano dos parâmetros ρ - θ . Portanto, pela equação 12, cada ponto (x, y) na imagem binária referente a objeto, gera uma curva senoidal em ρ - θ . Desta maneira, as curvas de pontos colineares na imagem binária se interceptam em um mesmo ponto em ρ - θ . Identificando estes valores de ρ e θ e utilizando novamente a equação 12 é possível localizar linhas na imagem pelos valores de x e y encontrados. Sendo assim, o algoritmo desenvolvido aplicava esta técnica e encontrava todos os valores de ρ e θ referentes aos pontos de interseções em cada imagem. Para evitar favorecimento de direções nas imagens, este algoritmo foi aplicado em uma máscara circular criada na parte central da imagem. Um esquema representativo destes passos para a identificação do ângulo de inclinação das linhas de cultura nas imagens pode ser visualizado pela Figura 3.

Observou-se em todas as imagens testadas que o ponto referente ao maior valor de interseções era representado por um ρ e θ que informava, corretamente, a posição e o ângulo de uma linha de cultura na imagem, ou seja, não era uma linha gerada por ruídos.

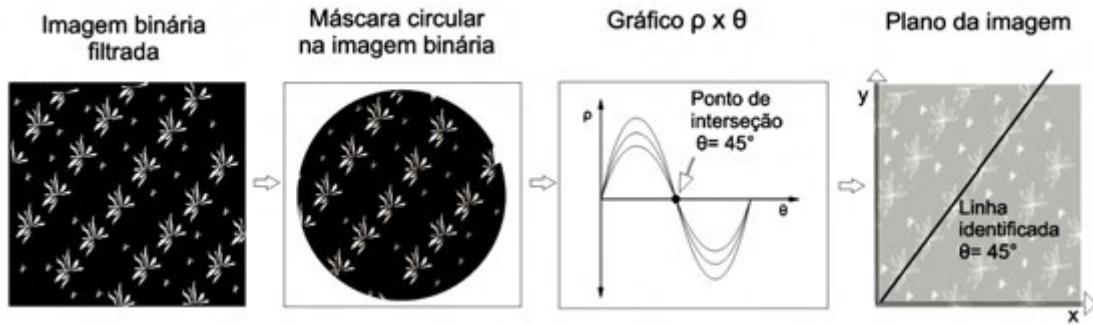


Figura 3 – Esquema representativo do processo de aplicação da máscara circular na imagem binária filtrada, da construção do gráfico $\rho \times \theta$ e identificação do ângulo de inclinação das linhas de cultura.

Portanto, o próximo passo consistiu em localizar as linhas de cultura para separá-las dos espaços entrelinhas. Para realizar esta localização, efetuou-se, primeiramente, a rotação das imagens, com base na inclinação determinada pela transformada de Hough, para deixar as linhas de cultura sempre posicionadas na vertical. Para efetuar a rotação, foi utilizada uma função disponível do LabView, sendo que a função de interpolação utilizada para reposicionar os *pixels* das imagens foi a bilinear.

Após a rotação das imagens foi construída uma função para recortar a parte comum nas duas imagens capturadas simultaneamente e para que as linhas de cultura tivessem o mesmo tamanho nesta parte comum, pois quando há linhas inclinadas e a imagem é rotacionada existirão linhas na vertical de diversos tamanhos. O valor desse recorte vai depender do tamanho das imagens e das distâncias entre as câmeras, ou seja, da área de sobreposição das duas imagens simultâneas. O processo de rotação e recorte das imagens está ilustrado por um esboço presente na Figura 4.

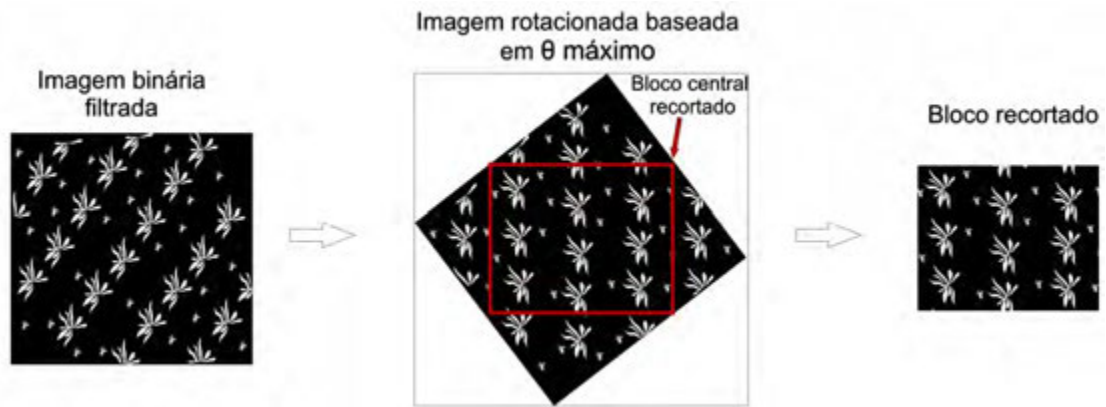


Figura 4 – Etapas de rotação e recorte das imagens binárias.

Por fim, com as linhas de cultura posicionadas verticalmente nas imagens, a última etapa se baseou em localizar e separar as linhas de cultura. Para efetuar este passo, foi implementada uma função que transformava as imagens em um sinal que representava a quantidade de *pixels* que indicava a presença de planta, por cada coluna. A partir da análise desse sinal, era possível identificar a posição e a largura das linhas de cultura, pois observando os picos do sinal verificou-se que estes representavam as linhas de cultura e os vales o espaço das entrelinhas. Conseqüentemente, os distúrbios ocorridos nos picos do sinal eram proporcionados principalmente pelas falhas e irregularidades das linhas de cultura e os distúrbios nos vales eram basicamente referentes à presença de plantas daninhas.

Para localizar e definir a largura das linhas de cultura em cada imagem calculou-se a média total do sinal e traçou-se a linha horizontal referente a este valor e atribuiu-se os limites das linhas de cultura às colunas da imagem referente aos pontos de interseções do sinal com esta linha horizontal.

Ao definir a posição e a largura das linhas de cultura efetuou-se a separação destas do espaço entrelinhas e calculou-se o percentual referente à cobertura das plantas daninhas em cada imagem, pela contagem dos *pixels* que as representavam. Assumiu-se que todas as plantas nas linhas identificadas eram culturas e nas entrelinhas eram plantas daninhas. A Figura 5 ilustra este processo de identificação das linhas de cultura das imagens.

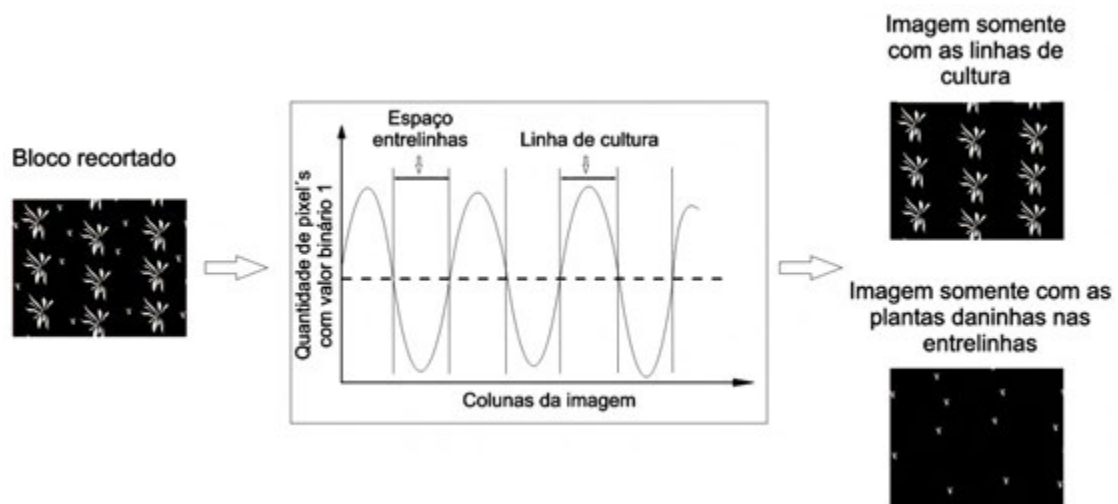


Figura 5 – Etapas do processo de identificação e separação das linhas de cultura e construção das imagens só com linhas de cultura e só com os espaços entrelinhas.

Os valores de percentuais da cobertura das plantas daninhas e seus respectivos valores de coordenadas foram gravados em um arquivo de dados para serem utilizados posteriormente na construção de mapas da cobertura de infestação de plantas daninhas de toda a área.

2.3. Avaliação dos algoritmos de processamento de imagens

Para avaliar o processamento das imagens realizou-se um estudo em uma área experimental de 0,8 hectares, pertencente à Universidade Federal de Viçosa (UFV) na cidade de Coimbra, MG. Esta área estava sob manejo de irrigação constituído por um pivô central, e a cultura implantada era feijão, cultivar ouro vermelho, utilizando os sistemas de plantio direto e convencional, cada um ocupando metade da área.

Utilizaram-se duas câmeras do modelo STH-DCSG-VAR/-C, sendo uma monocromática e outra colorida, compondo um sistema de aquisição de imagens. Estas câmeras capturaram duas imagens, simultaneamente, da mesma cena. Na câmera monocromática foi acoplado um filtro passa alta com início no comprimento de onda de 695 nm, para limitar a faixa do espectro que sensibiliza o sensor da câmera somente na faixa do infravermelho próximo

(NIR). Com isso foram obtidas imagens da banda do NIR e imagens coloridas, que contém as bandas R (vermelho), G (verde) e B (azul).

As câmeras foram conectadas a um microcomputador portátil por meio de cabos com 10 m de comprimento conectados em uma placa de aquisição de imagens PCMCIA IEEE 1394, que fez a interface das câmeras com o microcomputador. Para o funcionamento das câmeras foi utilizada uma bateria de 12 Vcc conectada à placa PCMCIA. O padrão das lentes utilizadas foi o C-mount com a distância focal de 2,8 mm e as imagens foram salvas no formato BMP (Bitmap) com dimensão de 480(V) x 640(H) *pixels*, utilizando o *software SRI's Small Vision System (SVS)*, que controla as câmeras, fornecido pelo próprio fabricante das câmeras. O sensor das câmeras, formador das imagens, foi o imageador CMOS MT9V022 no formato de 1/3". Estas câmeras foram posicionadas na estrutura móvel de um pivô central, na parte superior do mesmo, tendo suas lentes voltadas para baixo, focalizando o alvo (linhas de cultivo e entrelinhas).

Na realização desta avaliação ainda não havia sido implementada a interface do sistema automático de aquisição de imagens, por isso utilizou-se o programa de computador SVS, para adquirir as imagens.

Com isso, ao longo de toda a área foram obtidas, aleatoriamente, 10 imagens da banda do NIR e 10 imagens coloridas, em cada sistema de plantio. Essas imagens foram processadas e as respectivas imagens binárias filtradas foram geradas para poder ser efetuado o processo de avaliação.

A avaliação do sistema de processamento das imagens tomou como referência as imagens RGB, pela razão destas possuírem melhor visualização das feições (cultura, plantas daninhas, solo, palhada, etc.).

Sendo assim, em cada uma das imagens RGB foram escolhidos 100 pontos (*pixels*) aleatórios, e os mesmos pontos foram localizados nas respectivas imagens binárias filtradas geradas tanto pela própria imagem RGB quanto pela imagem NIR. Estes pontos foram comparados, de forma a verificar se o *pixel* escolhido na imagem de referência (RGB) condizia com o *pixel* processado nas imagens binárias (planta ou não-planta), sendo que planta refere-se à cultura; e planta daninha e não-planta referem-se às outras feições.

Por fim, calculou-se a matriz de confusão, utilizando o total de erros e acertos das 10 imagens, para cada sistema de plantio e tipo de câmera.

A matriz de confusão ou matriz de erro é uma matriz quadrática de números que expressam a quantidade de unidades amostrais, associada a uma dada categoria durante o processo de classificação efetuado e à categoria real a que pertencem essas unidades. A matriz de erros é uma forma útil para representar a exatidão, uma vez que as exatidões das diferentes classes estão claramente descritas, mostrando os erros de comissão e de omissão presentes na classificação de Congalton (1991). Este autor cita que a exatidão global, pode ser calculada dividindo-se o total de amostras corretamente classificadas (a diagonal da matriz de erros) pelo número total de amostras na matriz. A Tabela 1 exemplifica a matriz de erro calculada neste estudo.

Tabela 1 – Exemplo da matriz de confusão calculada para cada sistema de plantio e tipo de câmera

Valor estimado	Valor de referência		Erros de inclusão (%)
	Planta	Não-planta	
Planta	Número de pontos referentes a plantas classificados como planta (PP)	Número de pontos referentes a não-planta classificados como planta (NPP)	$\frac{(NPP)}{(PP) + (NPP)}$
Não-planta	Número de pontos referentes a plantas classificados como não-planta (PNP)	Número de pontos referentes a não-planta classificados como não-planta (NPNP)	$\frac{(PNP)}{(PNP) + (NPNP)}$
Erros de omissão (%)	$\frac{(PNP)}{(PP) + (PNP)}$	$\frac{(NPP)}{(NPP) + (NPNP)}$	Exatidão global (%) $\frac{(PP) + (NPNP)}{(PP) + (NPP) + (PNP) + (NPNP)}$

O erro de omissão é o erro em que o objeto não é classificado na classe à qual ele pertence e o erro de inclusão é o erro onde o objeto é incluído em uma classe a que ele não pertence.

Para mensurar o desempenho da classificação em cada sistema de plantio e tipo de câmera foi determinada a exatidão global e o índice Kappa,

descrito por Hudson e Ramm (1987). O índice Kappa, diferentemente da exatidão global, utiliza todos os dados da matriz de erro na sua fórmula, conforme a equação 13.

$$\hat{K} = \frac{n \sum_{i=1}^c x_{ii} - \sum_{i=1}^c x_{i\oplus} x_{\oplus i}}{n^2 - \sum_{i=1}^c x_{i\oplus} x_{\oplus i}} \quad (13)$$

em que \hat{K} é a estimativa do coeficiente Kappa; x_{ii} , valor na linha i e coluna i (diagonal) da matriz de erros; $x_{i\oplus}$, total da linha i ; $x_{\oplus i}$, total da coluna i ; n , número total de amostras; e c , número total de classes.

Kappa igual a zero significa que o acerto obtido pelo classificador é igual ao acerto por acaso. Valores positivos de Kappa ocorrem quando o acerto for maior que o acaso, enquanto os negativos ocorrem quando o acerto é pior do que uma classificação por acaso.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Aquisição dos dados

Na Figura 6, é apresentada a tela do painel de controle referente ao algoritmo da parte de aquisição dos dados. Esta tela é composta de 33 dispositivos entre botões de acionamento e controle, campos e led's indicadores, gráficos e telas de visualização das imagens, sendo que todos estes foram numerados e suas respectivas funcionalidades estão descritas na Tabela 2.

Antes de iniciar a aquisição dos dados, é necessário selecionar adequadamente as portas seriais que o GPS e as câmeras estão conectados e definir o sistema de separação de casas decimais, que vai depender do sistema numérico do computador utilizado. Os diretórios e nomes dos arquivos também precisam ser escolhidos para que os dados possam ser armazenados corretamente. Por fim, é necessário definir de quantos em quantos metros serão capturados os dados e os valores iniciais do obturador eletrônico das câmeras, para qualquer que seja a opção do modo de ajuste deste parâmetro: manual ou automática. Após estes ajustes, basta pressionar os botões que ligam as câmeras, representados pelos números 13 e 18, e ativar o botão Capturar Dados (número 22) ou pressionar a tecla F5, e esperar que o led de validação dos dados do GPS (número 3), confirme o recebimento completo dos

dados deste dispositivo. O acionamento do GPS se inicia ao selecionar na tela do painel de controle, a porta serial a qual este dispositivo está conectado.

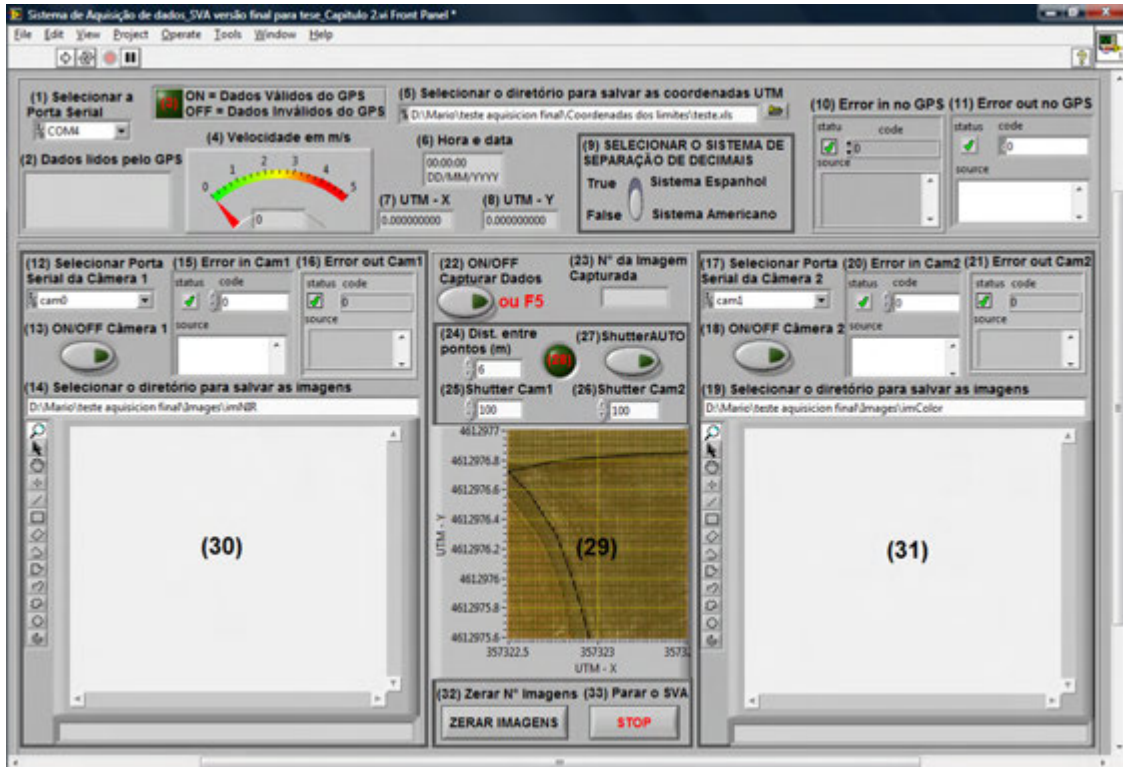


Figura 6 – Tela do painel de controle referente à aquisição dos dados.

Tabela 2 – Função de cada dispositivo presente na tela do painel de controle da aquisição de dados da Figura 6

Dispositivos	Descrição da função de cada dispositivo
1	Seleciona a porta serial que o GPS foi conectado
2	Campo de visualização dos dados lidos pelo GPS – sentença RMC
3	Led indicador se os dados recebidos do GPS são válidos
4	Velocidade de deslocamento do GPS em metros/segundo
5	Seleciona o diretório e o nome desejado do arquivo para salvar as coordenadas UTM
6	Campo contendo a hora e a data de cada coordenada recebida
7	Coordenada UTM – X em metros
8	Coordenada UTM – Y em metros
9	Seleciona o sistema de separação de decimais – Brasileiro/Espanhol (,) ou Americano (.)
10	Mensagem de erro da configuração da porta serial do GPS
11	Mensagem de erro da leitura dos dados do GPS
12	Seleciona a porta serial que a câmera 1 foi conectada
13	Botão que liga ou desliga a câmera 1
14	Seleciona diretório e o nome desejado para salvar as imagens da câmera 1
15	Mensagem de erro da comunicação e aquisição das imagens com a câmera 1
16	Mensagem de erro do encerramento de captura da câmera 1
17	Seleciona a porta serial que a câmera 2 foi conectada
18	Botão que liga ou desliga a câmera 2
19	Seleciona diretório e o nome desejado para salvar as imagens da câmera 2
20	Mensagem de erro na comunicação e aquisição das imagens com a câmera 2
21	Mensagem de erro do encerramento de captura da câmera 2
22	Botão ou tecla F5 que liga ou desliga a captura automática dos dados
23	Campo que informa o número da imagem que esta sendo capturada
24	Distância entre os pontos capturados em metros
25	Obturador eletrônico (SHUTTER) referente à câmera 1
26	Obturador eletrônico (SHUTTER) referente à câmera 2
27	Botão que liga ou desliga a função automática do SHUTTER
28	Led que indica se houve ou não captura de dados
29	Gráfico de visualização dos pontos capturados na área
30	Visualização da imagem adquirida pela câmera 1
31	Visualização da imagem adquirida pela câmera 2
32	Botão que zera o número das imagens
33	Para a aquisição dos dados

3.2. Processamento das imagens

3.2.1. Transformação das imagens RGB em ExG, limiarização e aplicação das operações morfológicas OPEN e CLOSE

A Figura 7 apresenta os resultados desta etapa do processamento das imagens, na tela do painel de controle, que teve início com a transformação das imagens RGB em imagens índice de excesso de verde (ExG). Em seguida, efetuou-se o cálculo do limiar iterativo automático baseado no histograma da imagem ExG e a limiarização. Após este processo de limiarização ocorreu a aplicação das operações morfológicas de abertura e fechamento (*OPEN* e *CLOSE*) para a remoção de ruídos.

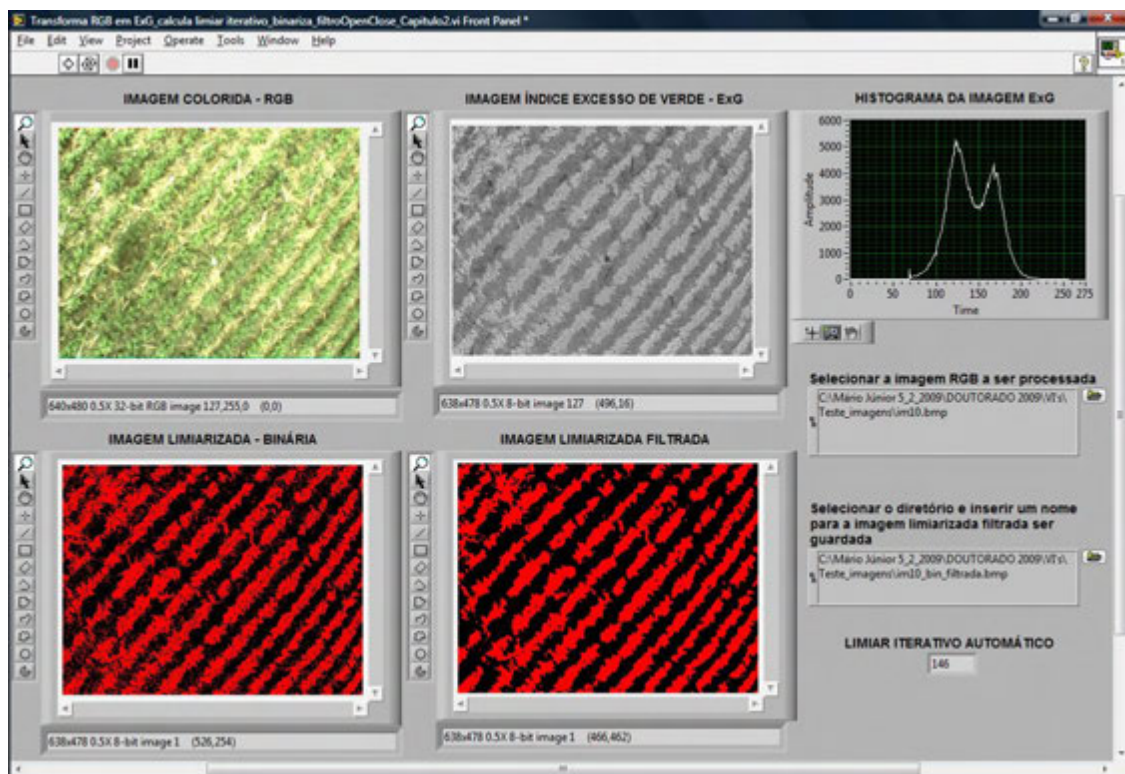


Figura 7 – Tela do painel de controle da parte inicial do processamento de imagens referente ao processo de limiarização das imagens.

Se forem capturadas imagens monocromáticas, como no caso das câmeras infravermelhas, os passos para limiarização são os mesmos, só não havendo a necessidade de transformar em imagem índice ExG.

A Figura 8 apresenta um destaque do efeito das operações morfológicas nas imagens limiarizadas, onde os ruídos gerados pelo processo de limiarização foram retirados.

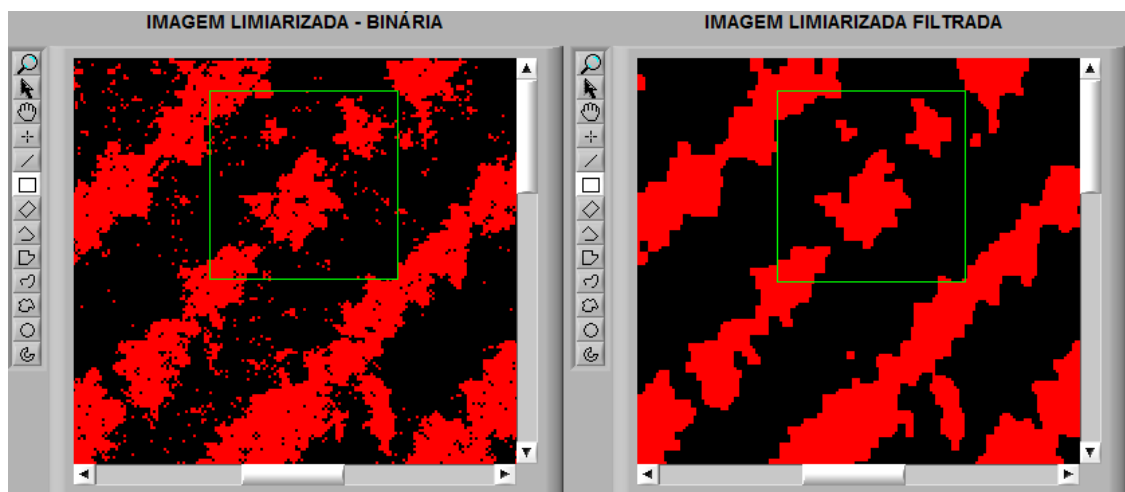


Figura 8 – Destaque do efeito das operações morfológicas na remoção dos ruídos gerados pela limiarização.

Consideraram-se ruídos *pixels* isolados classificados opostamente à feição pertencente a sua localização, ou seja, um *pixel* isolado classificado como planta presente nas entrelinhas ou um *pixel* isolado classificado como fundo presente na cultura.

3.2.2. Identificação do ângulo de inclinação das linhas de cultura nas imagens e rotação das imagens

Os resultados desta etapa de processamento das imagens estão apresentados na tela do painel de controle da Figura 9. Esta tela contém inicialmente a imagem limiarizada filtrada e a imagem resultante após a aplicação da máscara circular. Em seguida, após o cálculo da transformada de

Hough, apresentou-se nesta mesma tela o gráfico Rho (ρ) x Teta (θ), e os valores de Teta e Rho, os quais indicam o ponto no gráfico com o maior número de interseções, e o valor ângulo de rotação das imagens, para posicionar as linhas de cultura na vertical. Por fim, também foi apresentada a imagem rotacionada baseada no ângulo Teta, obtido pela transformada de Hough; e a imagem recortada, para que as linhas de cultura ficassem com o mesmo tamanho em toda a imagem. Nesta imagem recortada é que será efetuado o cálculo da porcentagem da cobertura de plantas daninhas nas entrelinhas na etapa seguinte. Nesta tela são disponibilizados os cálculos de porcentagem de toda a vegetação presente na imagem inicial desta etapa de processamento (imagem limiarizada e filtrada) e na imagem final (imagem recortada) para a observação das alterações, no percentual de *pixels* referente às plantas daninhas e cultura, decorrentes nesta etapa de processamento.

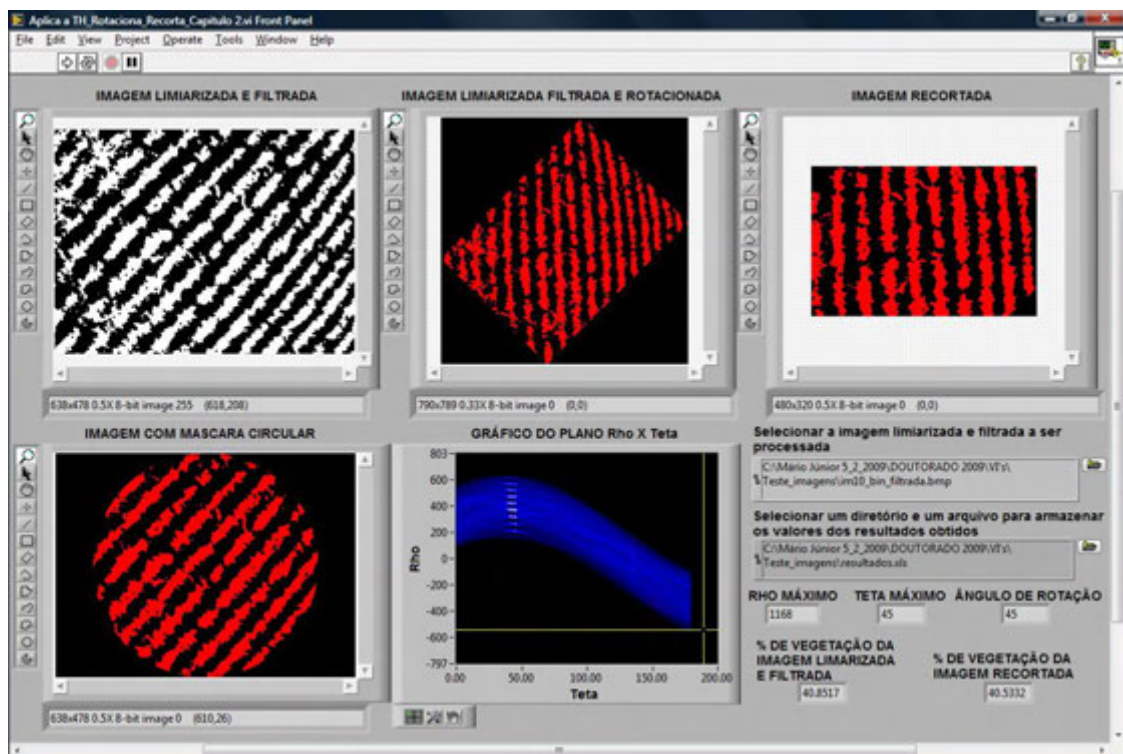


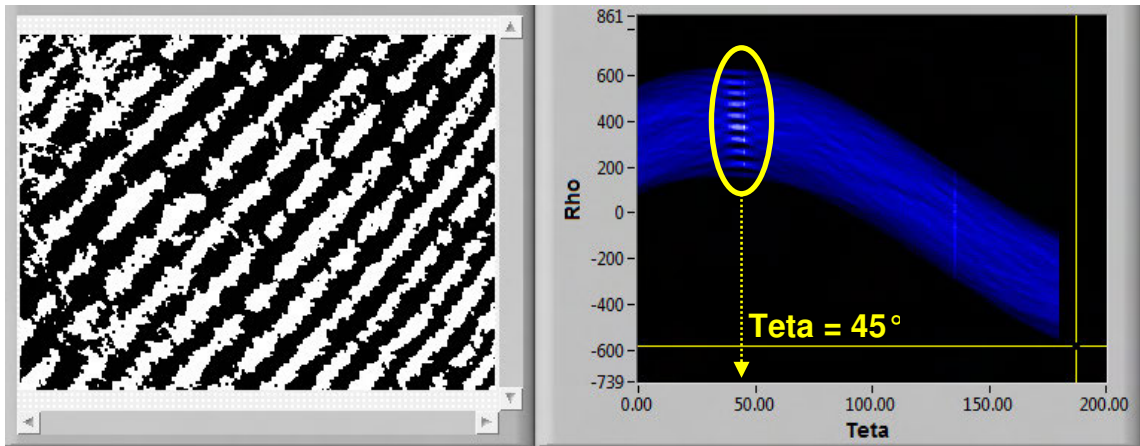
Figura 9 – Tela do painel de controle referente à identificação do ângulo de inclinação das linhas de cultura pela Transformada de Hough e rotação das imagens.

O gráfico Rho (ρ) x Teta (θ) foi apresentado para auxiliar na identificação do valor do ângulo de inclinação das linhas de cultura, denominado de “Teta máximo”, que é o ângulo referente ao ponto com o maior número de interseções das curvas. Este ângulo se localiza na região do gráfico com maior intensidade da cor branca. As Figuras 10a, 10b e 10c apresentam três imagens com diferentes ângulos de inclinação das linhas de cultura e o respectivo gráfico de Rho x Teta com a região das maiores interseções das curvas em destaque e o valor do ângulo referente ao ponto com maior número de interseções.

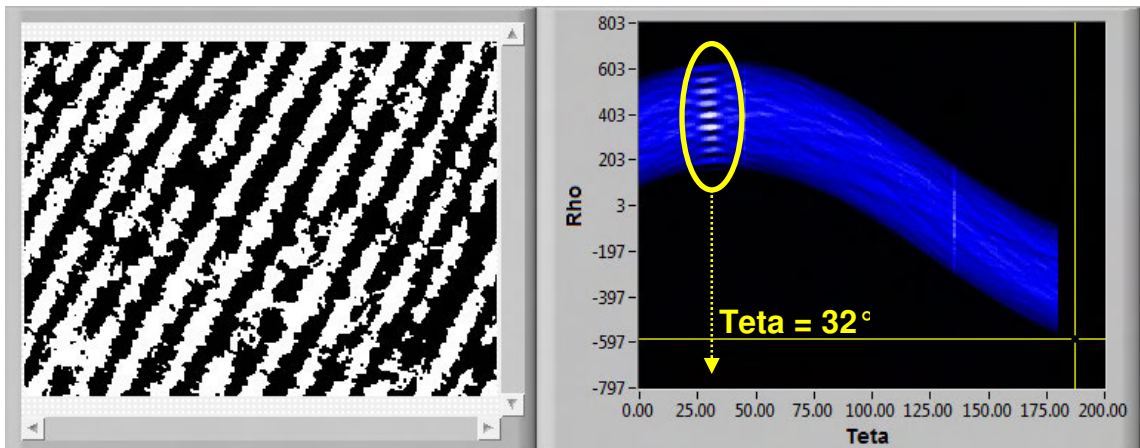
3.2.3. Segmentação das linhas de cultura e cálculo da porcentagem da cobertura de plantas daninhas

Os resultados desta última etapa de processamento das imagens podem ser visualizados pela tela do painel de controle da Figura 11. Primeiramente as imagens limiarizadas e recortadas pela etapa anterior foram apresentadas juntamente com seu respectivo sinal da quantidade de *pixels* com valor 1 (referente a plantas) por cada coluna da imagem. A partir desse sinal foi possível visualizar a representação de cada linha de cultura e dos espaços entrelinhas de toda a imagem, bem como a representação dos efeitos ocasionados pelas irregularidades, como as falhas nas linhas de cultura, a alta presença de plantas daninhas nas entrelinhas e os diferentes tamanhos e larguras das linhas de cultura. Os limites entre as linhas de cultura e os espaços das entrelinhas, representados no sinal pelas linhas verticais vermelhas, foram obtidos pelas interseções da linha da média total do sinal (linha horizontal amarela) com o próprio sinal. Toda parte do sinal acima desta linha horizontal representava as linhas cultura, e abaixo representavam os espaços das entrelinhas.

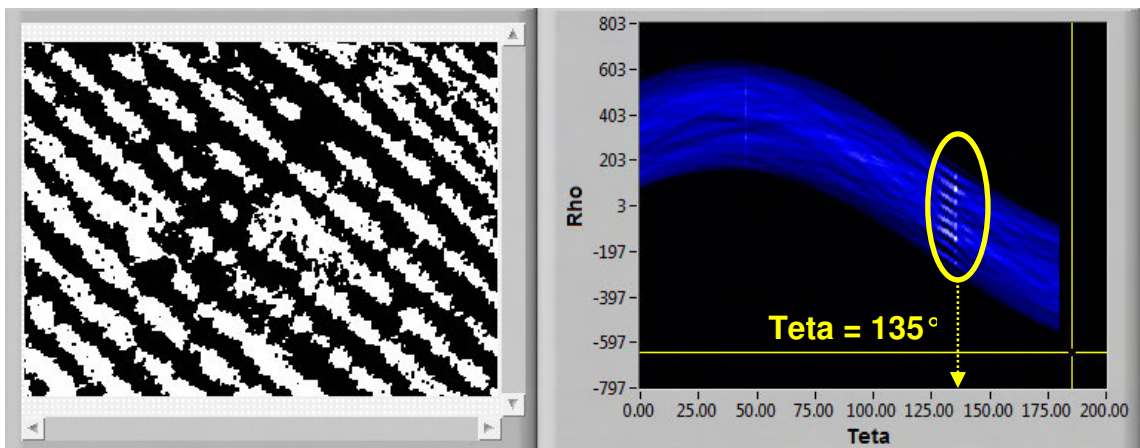
Também foram apresentadas as imagens resultantes deste processo de segmentação, que foram as imagens contendo somente as linhas de cultura e contendo somente os espaços das entrelinhas e os valores de porcentagem da cobertura de plantas daninhas, da cobertura referente à cultura e da cobertura da vegetação total.



(a)



(b)



(c)

Figura 10 – Imagens limiarizadas e filtradas com os respectivos gráficos de Rho x Teta, com a região das maiores interseções das curvas em destaque e o valor do ângulo no ponto de maior interseção das curvas, sendo este Teta igual a 45° (a), 32° (b) e 135° (c).

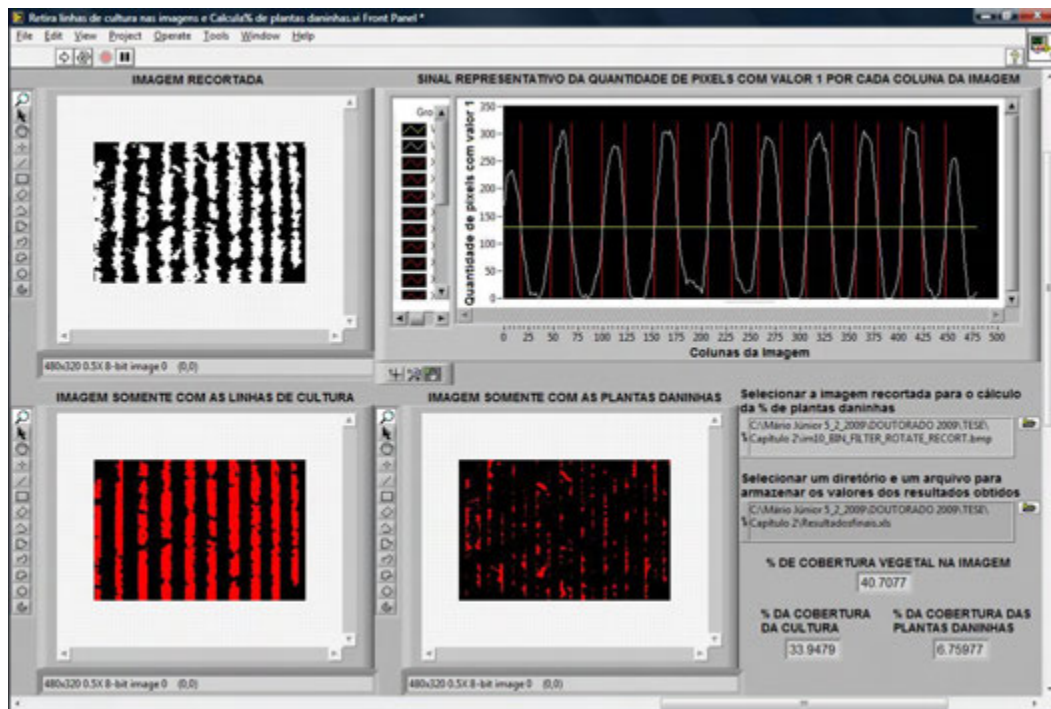
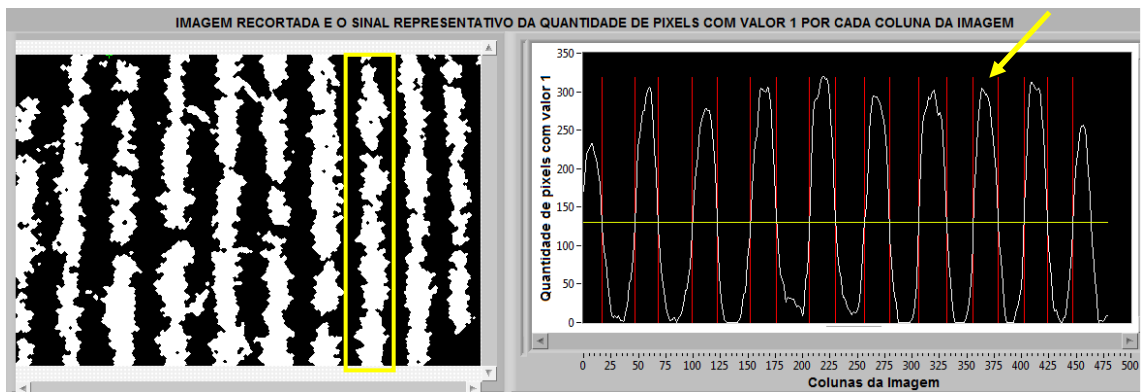


Figura 11 – Tela do painel de controle da segmentação das linhas de cultura e determinação do percentual da cobertura de plantas daninhas.

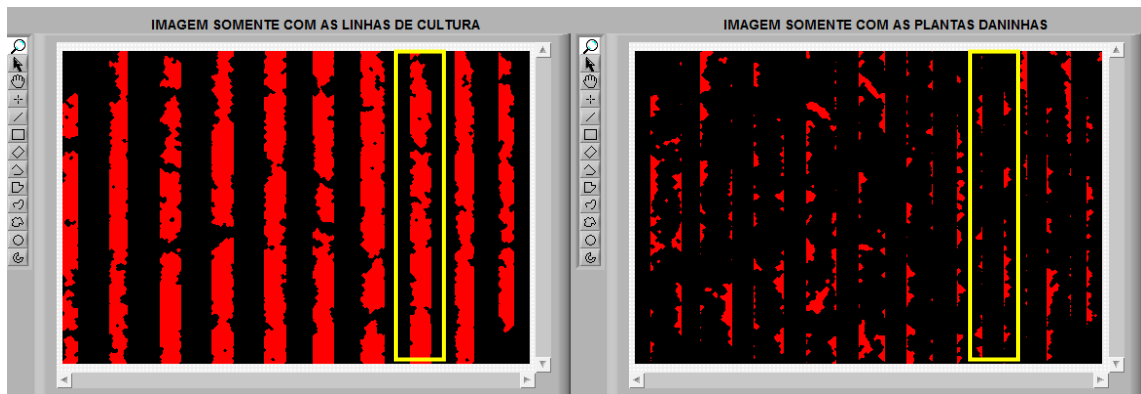
As Figuras 12 a 15 apresentam alguns exemplos dos problemas mais comuns ocorridos nesta etapa do processamento, sendo compostas pelas partes (a) e (b). Na parte (a) estão contidas imagens limiarizadas, filtradas e recortadas pelas etapas anteriores junto com seu respectivo sinal da quantidade de *pixels* referente a plantas por coluna. Na parte (b) estão apresentadas as duas imagens resultantes do processo de segmentação das linhas de cultura.

Com as linhas de cultura posicionadas verticalmente nas imagens, estas linhas foram representadas por uma faixa de colunas, e essa faixa foi determinada conforme a estratégia de segmentação adota, pelos pontos de interseção do respectivo sinal com a linha media total do sinal. Logo, as linhas de cultura separadas nas imagens possuíam um formato retangular. Entretanto, as linhas de cultura não possuem um formato regular e conseqüentemente, quando estas foram segmentadas com retângulos, algumas partes das suas bordas ficaram contidas no espaço das entrelinhas, sendo classificadas como plantas daninhas, conforme o exemplo da Figura

12b, afetando nos cálculos da porcentagem da cobertura das plantas daninhas. Para uma melhor visualização deste tipo de problema, destacou-se a região em torno de uma linha de cultura por meio de um retângulo amarelo (Figura 12a); e o semiciclo referente a esta linha no gráfico, pela seta amarela também presente na Figura 12a. Esta mesma região foi destacada por um retângulo amarelo nas imagens contendo somente as linhas de cultura e somente as entrelinhas (Figura 12b).



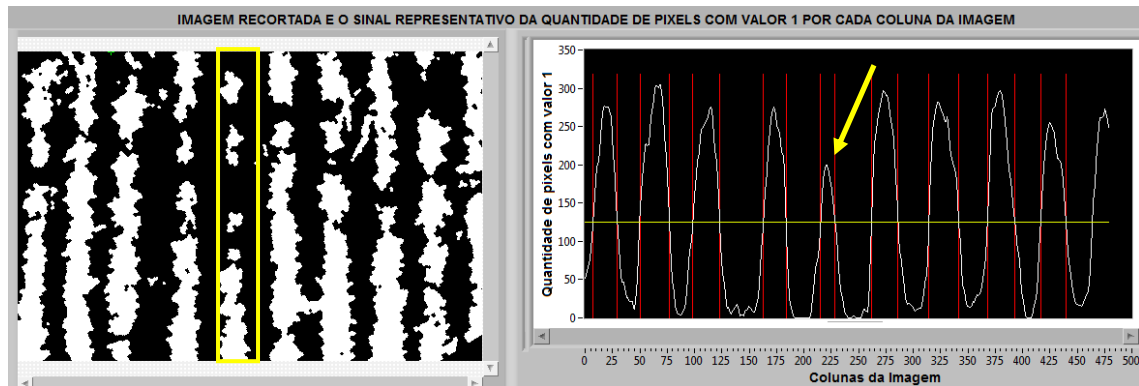
(a)



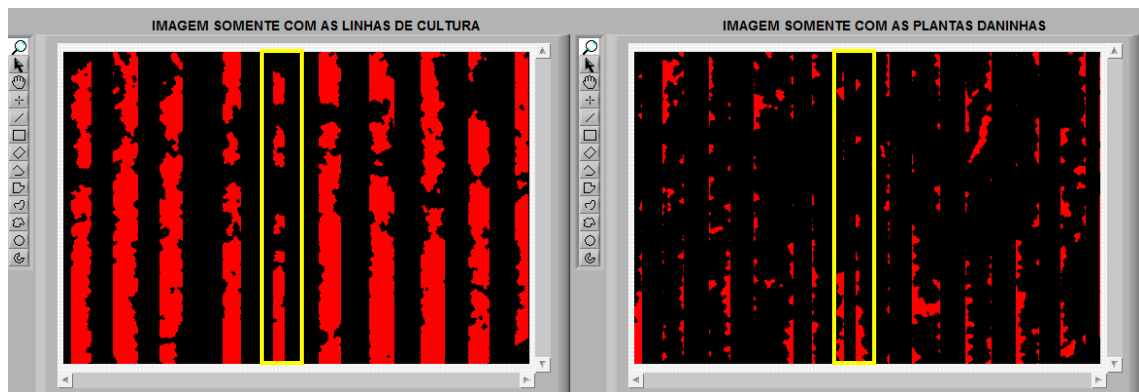
(b)

Figura 12 – Exemplo do problema de segmentação retangular das linhas de cultura, (a) contém a imagem limiarizada filtrada e o seu respectivo sinal da quantidade de *pixels* referentes às plantas por coluna e (b) contém as imagens somente com as linhas de cultura e somente com as entrelinhas.

A Figura 13 apresenta um exemplo para o problema gerado na segmentação das linhas de cultura, ocasionado pela ausência de plantas. Esta figura possui na parte (a), a imagem limiarizada filtrada onde foi destacada, por um retângulo amarelo, a região em torno de uma linha de cultura contendo falhas pela ausência de plantas.



(a)



(b)

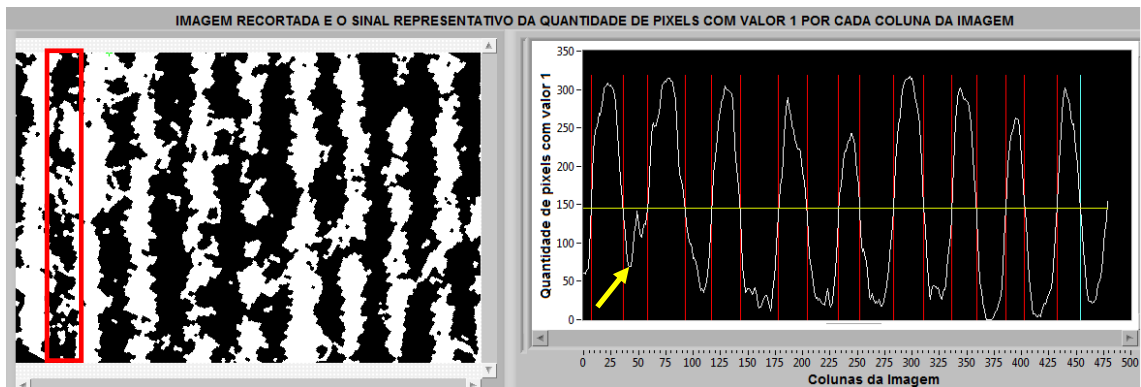
Figura 13 – Exemplo do problema gerado pela ausência de plantas nas linhas de cultura, (a) contém a imagem limiarizada filtrada e o seu respectivo sinal da quantidade de *pixels* referentes às plantas por coluna e (b) contém as imagens somente com as linhas de cultura e somente com as entrelinhas.

Pelo gráfico da Figura 13a é possível visualizar o efeito da falta de plantas nas linhas de cultura no sinal gerado, especificamente, no semicíclo apontado pela seta amarela, que representa a linha de cultura destacada na imagem limiarizada. A falta de plantas gerou uma diminuição no semicíclo destacado. Como as limitações das linhas de cultura, indicadas no sinal pelas linhas verticais vermelhas, são obtidas pela interseção do sinal com a linha da média total do sinal (linha horizontal amarela), a segmentação atribuiu uma menor área a esta linha de cultura, ocasionando uma maior presença de plantas da cultura (bordas) no espaço das entrelinhas. Esta diminuição de área da linha de cultura, bem como o aumento das bordas da cultura nas entrelinhas pode ser visualizada com destaque pela Figura 13b, nas regiões delimitadas pelo retângulo amarelo.

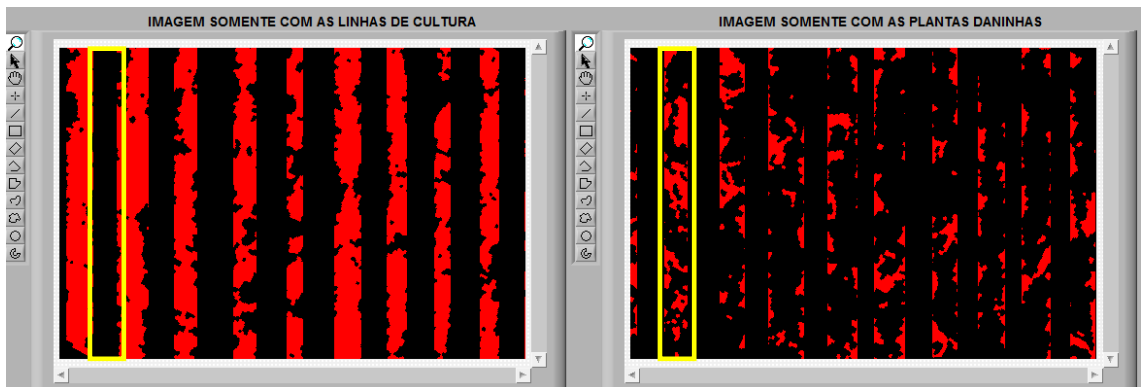
A Figura 14 apresenta um exemplo do que pode acontecer quando é alta a incidência de plantas daninhas no espaço das entrelinhas, chegando até a juntar as linhas de cultura, o que dificulta o discernimento entre cultura e planta daninha, prejudicando a segmentação das linhas de cultura e ocasionando mais erros ao cálculo da porcentagem da cobertura de plantas daninhas.

Um espaço entrelinhas, contendo alta infestação de plantas daninhas, foi destacado na Figura 14a, por um retângulo vermelho. As plantas daninhas, em algumas partes deste trecho, uniram-se às duas linhas de cultura. Este fato teve um efeito de minimizar o semicíclo abaixo da linha média (vale) no sinal, indicado pela seta amarela (Figura 14a). Esta minimização do vale pode fazer com que esta região do sinal ultrapasse a linha média total do sinal e como consequência disso a faixa da entrelinha será considerada como linha de cultura.

Neste exemplo, também se pode visualizar, pela Figura 14b, que quanto mais plantas daninhas existirem nas entrelinhas, mais difícil será de encontrar a divisão entre linhas de cultura e entrelinhas.



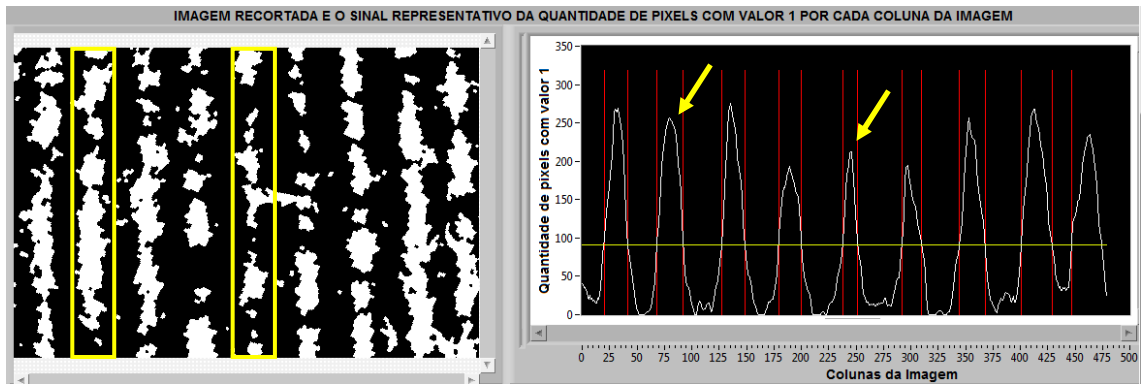
(a)



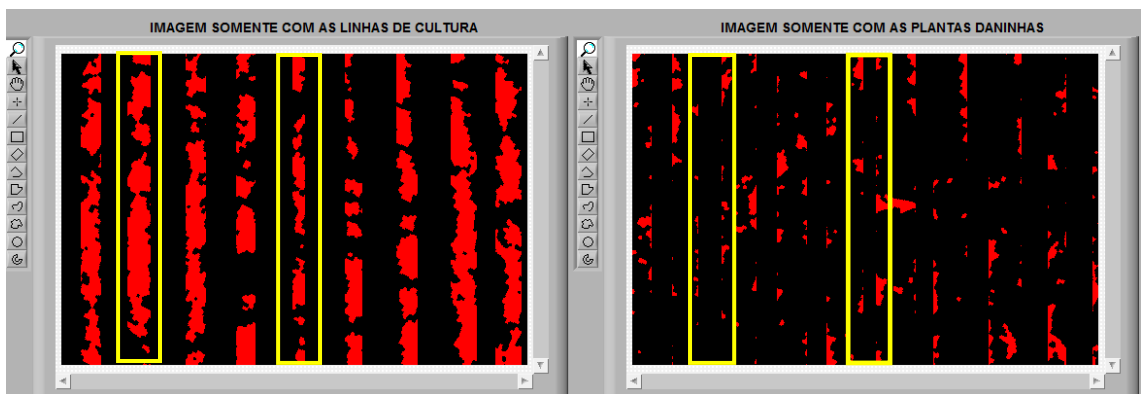
(b)

Figura 14 – Exemplo do problema gerado pela alta infestação de plantas daninhas nas entrelinhas, (a) contém a imagem limiarizada filtrada e o seu respectivo sinal da quantidade de *pixels* referentes às plantas por coluna e (b) contém as imagens somente com as linhas de cultura e somente com as entrelinhas.

A Figura 15 apresenta um enfoque das irregularidades das linhas de cultura, onde em uma mesma imagem é possível encontrar, linhas com larguras diferentes. Sendo assim, na Figura 15a, destacaram-se duas linhas de cultura, envoltas por dois retângulos amarelos. Estas duas linhas possuem larguras bem distintas mesmo estando próximas na área cultivada, e esta diferença pode ser percebida pelo respectivo sinal também presente nesta mesma figura.



(a)



(b)

Figura 15 – Exemplo do efeito de diferentes larguras entre as linhas de cultura em uma mesma imagem, (a) contém a imagem limiarizada filtrada e o seu respectivo sinal da quantidade de *pixels* referentes às plantas por coluna e (b) contém as imagens somente com as linhas de cultura e somente com as entrelinhas.

As duas linhas de cultura destacadas na imagem 15a tiveram seus semicírculos indicados no sinal pelas setas amarelas, evidenciando este fato pela forma do sinal, pois a diminuição da largura das linhas gera a diminuição da largura do sinal. Entretanto, como o tamanho das linhas de cultura a serem segmentadas depende da média total do sinal, essa diferença entre larguras das linhas de cultura dentro de uma mesma imagem afetará no processo de segmentação, ocasionando um aumento das bordas das linhas de cultura nos espaços das entrelinhas, conforme ilustra a Figura 15b nas regiões destacadas pelos retângulos amarelos. A linha de cultura mais fina, no processo de segmentação, foi representada por uma faixa de colunas menor ainda, o que

proporcionou maior quantidade de bordas nos espaços das entrelinhas ao redor desta linha de cultura.

3.3. Resultados da avaliação do processamento das imagens

As matrizes de confusão obtidas em cada sistema de plantio e tipo de câmera estão apresentadas nas Tabelas de 3 a 6.

Tabela 3 – Matriz de confusão referente à câmera RGB no plantio convencional

Valor estimado	Valor de referência		Erros de inclusão (%)
	Planta	Não-planta	
Planta	491	5	1
Não-planta	169	335	34
Erros de omissão (%)	26	1	Exatidão global (%) 83

Tabela 4 – Matriz de confusão referente à câmera NIR no plantio convencional

Valor estimado	Valor de referência		Erros de inclusão (%)
	Planta	Não-planta	
Planta	286	18	6
Não-planta	374	322	54
Erros de omissão (%)	57	5	Exatidão Global (%) 61

Tabela 5 – Matriz de confusão referente à câmera RGB no plantio direto

Valor estimado	Valor de referência		Erros de inclusão (%)
	Planta	Não-planta	
Planta	518	0	0
Não-planta	142	340	29
Erros de omissão (%)	22	0	Exatidão Global (%) 86

Tabela 6 – Matriz de confusão referente à câmera NIR no plantio direto

Valor estimado	Valor de referência		Erros de inclusão (%)
	Planta	Não-planta	
Planta	374	30	7
Não-planta	286	310	48
Erros de omissão (%)	43	9	Exatidão Global (%) 68

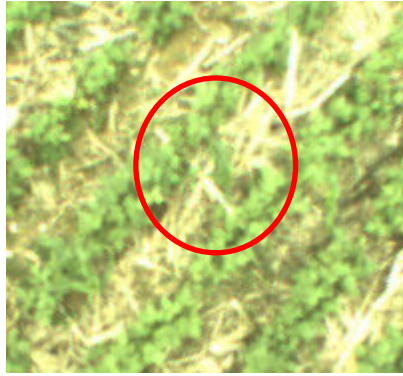
É possível observar em relação aos tipos de câmeras, que os maiores valores de exatidão global foram atribuídos às imagens processadas da câmera RGB independente do sistema de plantio. Em relação ao tipo de sistema de plantio os maiores valores de exatidão global foram atribuídos ao sistema de plantio direto em ambas as câmeras utilizadas. Isto indica que a câmera RGB obteve maior potencial em diferenciar plantas de não-planta do que a câmera NIR e que o sistema de plantio direto favoreceu esta diferenciação nas duas câmeras.

Os valores do índice Kappa foram respectivamente, 0,65 e 0,30, para as câmeras RGB e NIR no sistema de plantio convencional e 0,71 e 0,40, para as câmeras RGB e NIR no sistema de plantio direto. Estes valores indicam que

todas as classificações entre planta e não-planta pelo processamento das imagens foram melhores que uma classificação ao acaso e ainda reforçam o potencial da câmera RGB em detectar planta e não-planta e o favorecimento nesta detecção com o uso do sistema de plantio direto. Segundo os critérios utilizados por Landis e Koch (1977), na avaliação dos valores obtidos de Kappa, a classificação atribuída à câmera RGB, em ambos os sistemas de plantio, apresentou uma performance muito boa. Já a classificação atribuída à câmera NIR nos dois sistemas de plantio, apresentou um desempenho razoável.

Durante o processamento das imagens observou-se que as imagens geradas pela câmera NIR foram menos capazes em diferenciar planta das demais feições presentes na imagem, independente do sistema de plantio, ocasionando um maior erro no processo de limiarização. A Figura 16 apresenta um exemplo que justifica esse fato. Nela foi realizada uma comparação entre uma imagem RGB sob o sistema de plantio direto (Figura16a), a sua respectiva imagem limiarizada filtrada (Figura16b) e a imagem limiarizada filtrada da mesma área, entretanto, capturada simultaneamente pela câmera NIR (Figura16c). A imagem RGB foi utilizada como referência nessa comparação, pois possui melhor retratação da cena em questão do que a imagem NIR.

As regiões em destaque, pelos círculos vermelhos, representam a mesma região em todas as imagens. Esta região do círculo contém uma pequena reboleira de plantas daninhas entre duas linhas cultura. Esta reboleira na imagem da Figura 16c obteve maior tamanho do que na imagem RGB, além de ter unido as duas linhas de cultura. Já na Figura 16b esta mesma reboleira teve um tamanho mais próximo da realidade, como apresentado pela imagem RGB. Além disso, pode-se observar outro fato na área contida no círculo vermelho da imagem limiarizada da Figura 16c, onde uma parte da palhada foi classificada como planta daninha, comprovando assim uma superestimação na classificação dos *pixels* em plantas pelas imagens NIR, o que justifica o valor de erro médio mais alto.



(a)



(b)



(c)

Figura 16 – Exemplo do efeito do processamento nas imagens RGB e NIR.

Por fim, pode-se deduzir que a câmera RGB seria a mais indicada para a confecção dos mapas de percentual da cobertura de plantas daninhas e que o sistema de plantio direto seria o sistema mais favorável a identificação das linhas de cultura e da cobertura das plantas daninhas.

4. CONCLUSÕES

Os algoritmos desenvolvidos promoveram a captura de imagens e coordenadas simultaneamente e automaticamente e a determinação da porcentagem da cobertura de plantas daninhas nas entrelinhas.

O tipo da câmera utilizada influenciou diretamente no desempenho dos algoritmos do processamento das imagens para obtenção da porcentagem da cobertura de plantas daninhas nas entrelinhas.

5. REFERÊNCIAS

BAIO, F.H.R. **Aplicação localizada de defensivos baseada na variabilidade espacial das plantas daninhas**. 2001. 113 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, SP.

CONGALTON, R.G. A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. **Remote Sensing of Environment**, n. 37, p. 35-46, 1991.

DUDA, R.O.; HART, P.E. Use of the Hough transformation to detect lines and curves in pictures. **Communications of the ACM**, v. 15, n. 1, p. 11-15, 1972.

ESPINOSA, A.T.; PONCE, A.J.R.; REYES, M.M. Desarrollo de *software* para el manejo de información catastral. **Reportes Técnicos en Ingeniería del Software**, v. 9, n. 1, p. 1-13, 2007.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS – FAO. Disponível em: <<http://www.fao.org/news/story/en/item/29402/icode/>>. Acesso em: 11 jan. 2010.

GÉE, C.; BOSSU, J.; JONES, G.; TRUCHETET, F. Crop/weed discrimination in perspective agronomic images. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 60, p. 49-59, 2008.

GOMES, O.F.M. **Processamento e análise de imagens aplicados à caracterização automática de materiais**. 2001. 151 f. Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia Metalúrgica) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ.

HUDSON, W.D.; RAMM, C.W. Correct formulation of the kappa coefficient of agreement. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 53, n. 4, p. 421-422, 1987.

LANDIS, J.R.; KOCH, G.G. The measurement of observer agreement for categorical data. **Biometrics**, v. 33, n. 1, p. 159-174, 1977.

MOLIN, J.P. Agricultura de precisão: fundamentos e estado atual da arte. In: CÂMARA, G.M. **Soja: tecnologia da produção II**. Piracicaba: ESALQ/ Departamento de Produção Vegetal, 2000. p. 423-437.

PITELLI, R.A. Competição e controle das plantas daninhas em áreas agrícolas. **Série Técnica IPEF**, v. 4, n. 12, p. 1-24, 1987.

RONCHI, C.P.; TERRA, A.A.; SILVA, A.A.; FERREIRA, L.R. Acúmulo de nutrientes pelo cafeeiro sob interferência de plantas daninhas. **Planta Daninha**, v. 21, n. 2, p. 219-227, 2003.

SHIRATSUCHI, L.S. **Mapeamento da variabilidade espacial das plantas daninhas com a utilização de ferramentas da agricultura de precisão**. 2001. 96 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, SP.

TELLAECHE, A.; BURGOSARTIZZU, X.P.; PAJARES, G.; RIBEIRO, A.; FERNÁNDEZ-QUINTANILLA, C. A new vision-based approach to differential spraying in precision agriculture. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 60, p. 144-155, 2008.

WOEBBECKE, D.M.; MEYER, G.E.; VON BARGEN, K.; MORTENSEN, D.A. Color indices for weed identification under various soil, residue, and lighting conditions. **Transactions of the ASAE**, v. 38, n. 1, p. 259-269, 1995.

YANG, X.; BEYENAL, H.; GARY, H.; LEWANDOWSKI, Z. Evaluation of biofilm image thresholding methods. **Water Research**, v. 35, p. 1149-1158, 2001.

CAPÍTULO 2

MAPEAMENTO DA COBERTURA DE PLANTAS DANINHAS NA CULTURA DO FEIJÃO UTILIZANDO UM SISTEMA DE VISÃO ARTIFICIAL (SVA) ACOPLADO A UM PIVÔ CENTRAL

1. INTRODUÇÃO

No Brasil, o feijão é um dos componentes básicos da dieta alimentar da população e importante fonte de proteína para as classes economicamente menos favorecidas. As Américas respondem por 43,2% do consumo mundial, seguidas da Ásia (34,5%), África (18,5%), Europa (3,7%) e Oceania (0,1%) (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA, 2009). De acordo com os mesmo autores, por ser uma cultura de ciclo relativamente curto, o feijoeiro é bastante sensível à competição de plantas daninhas, sobretudo nas fases iniciais de desenvolvimento. Segundo Kozlowski *et al.* (2002), a interferência das plantas daninhas na cultura do feijão pode causar redução de 15 a 80% na produção.

A aplicação de herbicidas é o método mais amplamente utilizado para controlar o desenvolvimento das plantas daninhas, em decorrência da alta eficiência e praticidade (CONCENÇO *et al.*, 2006).

A aplicação comumente utilizada pelos agricultores, o modo convencional, ocorre pulverizando o herbicida de forma uniforme por toda área.

Este método promove o despejo de produto químico tanto na cultura quanto em áreas sem plantas daninhas, gerando acréscimo nos gastos da produção agrícola além de contaminar o meio ambiente. Portanto, o uso correto de herbicidas possibilita grande eficiência de controle das plantas daninhas, maior praticidade e maior rendimento de grãos (MACHADO *et al.*, 2006).

O controle das plantas daninhas passa por crescente evolução no processo de pulverização, levando em consideração a variabilidade espacial das plantas daninhas nas áreas agrícolas para promover a aplicação localizada de defensivos (SHIRATSUCHI; CHRISTOFFOLETI, 2002). Estes autores citam que vários experimentos já demonstraram que a aplicação localizada de herbicidas é mais econômica que a aplicação convencional.

O mapeamento de plantas daninhas torna-se uma ferramenta útil para a aplicação localizada de herbicida, pois identifica e informa a variabilidade destas ao longo de toda área. Esta ferramenta está inserida na filosofia da agricultura de precisão, cujo objetivo é obter a otimização da produção, podendo gerar aumento da produtividade e redução dos impactos ambientais das atividades agrícolas.

Pierce e Nowak (1999) definem a agricultura de precisão como a aplicação de princípios e tecnologias para manejar a variabilidade espacial e temporal, associada com todos os aspectos da produção agrícola, com o objetivo de aumentar a eficiência na agricultura e a qualidade ambiental.

A habilidade de se descrever e mapear a distribuição espacial das plantas daninhas é o primeiro passo para o estudo da variabilidade espacial das mesmas e da determinação da melhor metodologia para a aplicação localizada de defensivos (BALASTREIRE; BAIIO, 2001).

Lamb e Brown (2001) citam que o mapeamento de plantas daninhas pode ser obtido utilizando diversas técnicas, porém uma das mais promissoras é o sensoriamento remoto. Os autores afirmam que uma das principais vantagens desta técnica é a extração de informações por imagens digitais, podendo estas ser adquiridas praticamente de forma instantânea e gerando rapidamente um mapa de plantas daninhas. Outro fato que favorece a aplicação do sensoriamento remoto é a popularização das câmeras digitais e a versatilidade de seu uso, sendo que estas podem ser instaladas nas mais

diversas plataformas, como aviões, balões, aeromodelos rádio-controlados; ou instaladas em veículos que circulam sobre o campo a ser mapeado (ANTUNIASSI, 1998).

Senay *et al.* (1998) relatam que estudos têm demonstrado que as técnicas de sensoriamento remoto e processamento de imagens digitais podem ser utilizadas na aplicação da agricultura de precisão, porém é necessário o desenvolvimento de técnicas para extrair informações pertinentes das imagens.

Um dos sistemas de irrigação que vem se destacando no cenário brasileiro é o sistema de irrigação por pivô central, tanto em sistema de plantio direto quanto convencional. Como o pivô central é uma estrutura que passa por toda a área cultivada, isso pode torná-lo útil também no mapeamento das plantas daninhas, já que câmeras digitais podem ser acopladas em sua estrutura, formando assim um sistema de visão artificial. Com este sistema pode-se obter a retratação de toda a área por meio de imagens digitais e a partir destas imagens ser possível mapear a variabilidade espacial das plantas daninhas bem como a de outros atributos.

Contudo um grande desafio no desenvolvimento de sistemas de visão artificial, ainda é a implementação de algoritmos capazes de identificar e classificar os objetos de interesse nas imagens e nas condições agrícolas.

As bandas espectrais ou índices espectrais podem auxiliar no mapeamento de plantas, pois minimizam variações de fatores externos e promovem o realce dos objetos de interesse. Além disso, com as técnicas de processamento e análise de imagens por meio dos modelos de cores RGB é possível extrair informações importantes da imagem favorecendo a identificação de cultura e plantas daninhas (SARTORI *et al.*, 2005).

Estes sistemas de visão artificial podem atuar no mapeamento de plantas daninhas capturando imagens que retratam toda a área de estudo ou imagens que representam apenas amostras da área. Para retratar toda a área, dependendo do tamanho da área, torna-se inviável a captura de imagens em plataformas terrestres devido ao grande número de imagens e pela dificuldade em unir as imagens em mosaicos devida as suas similaridades. Surge então a possibilidade de obter imagens capturadas por plataformas aéreas ou orbitais podendo ainda ser necessário fazer uso de mosaicos. Entretanto, isso pode

tornar o processo de mapeamento mais oneroso o que faz com que a adoção de amostras da área por imagens se torne um método com potencial de uso.

Para construir mapas por meio de amostras da área, é necessário fazer uso da geoestatística. Esta ferramenta é capaz de atribuir valor aonde não se capturou informação, utilizando modelos estatísticos e de interpolação, possibilitando analisar e deduzir os valores de uma variável distribuída no espaço.

A implementação de técnicas de manejo para aplicação localizada de defensivos agrícolas pode auxiliar os agricultores na otimização de sua produção, melhorando sua qualidade e reduzindo futuros problemas ambientais.

Dessa maneira, objetivou-se com este trabalho mapear o percentual da cobertura de plantas daninhas nas entrelinhas utilizando imagens digitais e geoestatística.

2. MATERIAL E MÉTODOS

O presente trabalho foi conduzido em uma área experimental de 0,8 hectares, pertencente à Universidade Federal de Viçosa (UFV) na cidade de Coimbra, MG. Esta área estava sob manejo de irrigação constituído por um pivô central, e a cultura implantada foi feijão, cultivar ouro vermelho, utilizando os sistemas de plantio direto e convencional, cada um ocupando metade da área.

2.1. Sistema de visão artificial

O sistema de visão artificial (SVA) foi formado por duas câmeras do modelo STH-DCSG-VAR/-C, sendo uma monocromática e outra colorida, compondo um sistema de aquisição de imagens e um microcomputador portátil. Estas câmeras capturaram duas imagens, simultaneamente, da mesma cena. Na câmera monocromática foi acoplado um filtro passa alta com início no comprimento de onda de 695 nm, para limitar a faixa do espectro que sensibiliza o sensor da câmera somente na faixa do infravermelho próximo (NIR). Com isso foram obtidas imagens da banda do NIR e imagens coloridas, que contém as bandas R (vermelho), G (verde) e B (azul).

As câmeras foram conectadas a um microcomputador portátil por meio de cabos com 10 m de comprimento conectados em uma placa de aquisição de

imagens PCMCIA IEEE 1394, que fez a interface das câmeras com o microcomputador. Para o funcionamento das câmeras foi utilizada uma bateria de 12 Vcc conectada à placa PCMCIA. O padrão das lentes utilizadas foi o C-mount com a distância focal de 2,8 mm e as imagens foram salvas no formato BMP (Bitmap) com dimensão de 480(V) x 640(H) *pixels*, utilizando o *software SRI's Small Vision System (SVS)*, que controla as câmeras, fornecido pelo próprio fabricante das câmeras. O sensor das câmeras, formador das imagens, foi o imageador CMOS MT9V022 no formato de 1/3". Estas câmeras foram posicionadas na estrutura móvel de um pivô central, na parte superior do mesmo, tendo suas lentes voltadas para baixo, focalizando o alvo (Figura 1).



Figura 1 – Sistema de visão artificial com as câmeras, microcomputador e um exemplo do ponto de referência (estaca).

Neste SVA ainda não havia sido implementada a interface do sistema automático de aquisição de imagens e coordenadas, abordada no capítulo 1. Por isso utilizou-se o *software* SVS para adquirir as imagens e foram fixadas estacas na área coberta pelo pivô, para nestas serem capturadas as coordenadas utilizando um DGPS Trimble Pathfinder Pro XRS.

As câmeras foram deslocadas manualmente na estrutura do pivô enquanto este efetuava seu giro, fazendo com isso aquisição de imagens ao longo de toda a área do pivô. A movimentação do pivô ocorreu sem o funcionamento da irrigação.

Quando a estaca era visualizada aproximadamente no ponto médio da imagem, esta era capturada. As estacas foram dispostas em seções circulares de forma que a distância entre estacas na mesma seção era de 6,5 m em linha reta, e a distância entre seções também era de 6,5 m. A Figura 2 apresenta um esquema representativo dos pontos georreferenciados pelo DGPS nas estacas na área do pivô, onde cada “x” representa um ponto na área e a linha negra ilustra a divisão da área de acordo com o tipo de plantio, sistema de plantio convencional e sistema de plantio direto. Um total de 75 pontos foi capturado no sistema de plantio convencional e 82 pontos no sistema de plantio direto. Cada imagem então obteve um ponto com as coordenadas conhecidas e a este foi assumido o ponto central das imagens.

Todas as imagens foram adquiridas aos 25 dias após a emergência (DAE) das plantas e em condições de céu nublado.

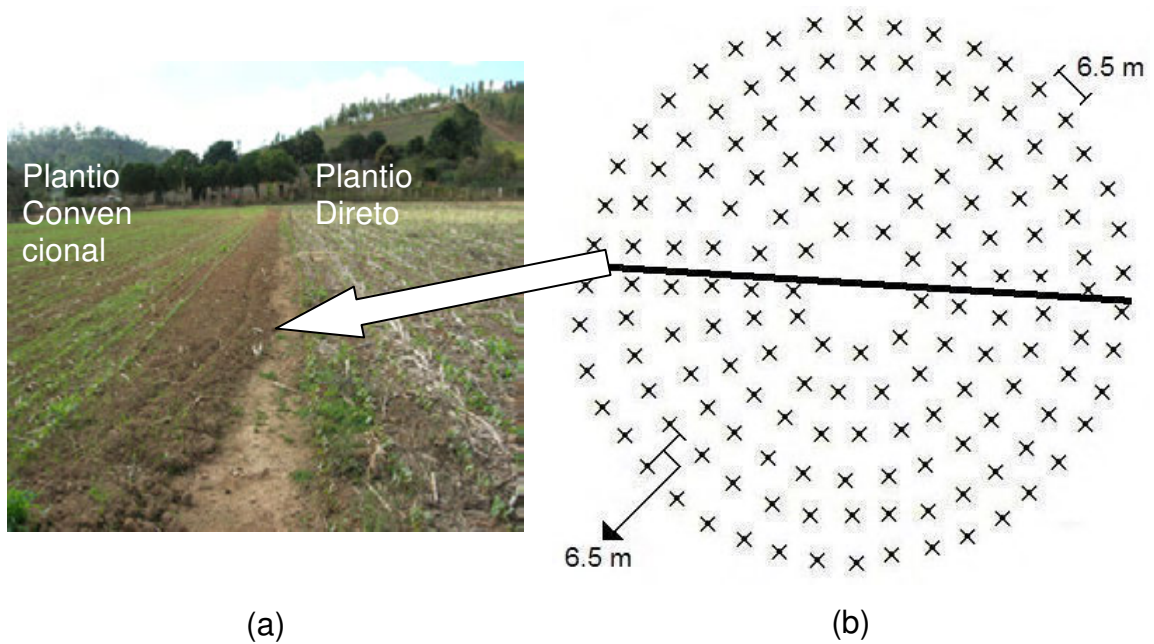


Figura 2 – Faixa de divisão dos sistemas de plantio (a) e esquema representativo dos pontos amostrados e georreferenciados na área de estudo (b).

2.2. Processamento e análise de imagens

As etapas do processamento das imagens RGB e NIR realizado pelo SVA para efetuar o cálculo da porcentagem da cobertura de plantas daninhas estão apresentadas no fluxograma da Figura 3, todas estas etapas foram detalhadas no capítulo 1.

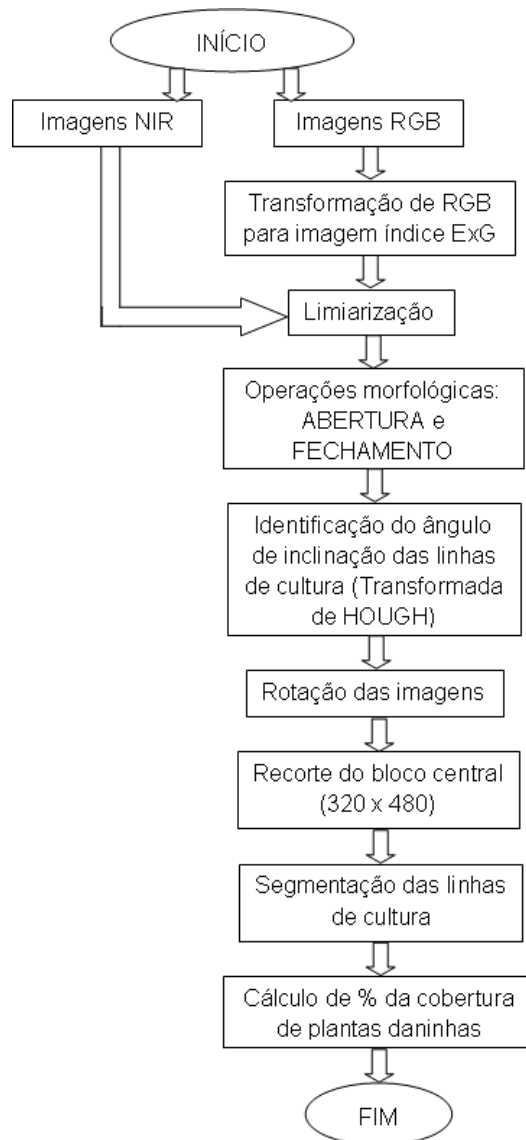


Figura 3 – Fluxograma das etapas de processamento de imagens para cálculo da porcentagem de cobertura das plantas daninhas.

O processamento deu início com a transformação das imagens RGB na imagem índice de excesso de verde (ExG) para em seguida serem limiarizadas, segmentando a imagem em duas classes, plantas (cultura e daninhas) e fundo (solo, palhada, etc.). As imagens NIR, como são monocromáticas, foram limiarizadas diretamente e não sofreram o processo de transformação em imagem ExG. Após a limiarização foram aplicadas as operações morfológicas de abertura e fechamento nas imagens de forma a eliminar ruídos gerados pelo processo de limiarização. A próxima etapa consistiu na identificação do ângulo de inclinação das linhas de cultura nas imagens, pois como o pivô central exerce um movimento circular e as câmeras

foram fixadas em sua estrutura, as linhas de cultura ficaram posicionadas em várias direções nas imagens. Encontrado o ângulo das linhas de cultura de cada imagem estas foram rotacionadas de forma a deixar as linhas de cultura sempre posicionadas na vertical e com isso facilitar a identificação e largura destas linhas. Na etapa seguinte recortou-se um bloco de 320(V) x 480(H) no centro de cada imagem para garantir que toda a área das imagens fosse comum às imagens RGB e NIR capturadas simultaneamente e para que as linhas de cultura tivessem o mesmo tamanho nas imagens. Nesses blocos é que o SVA identificou a posição e a largura das linhas de cultura e as removeu da imagem. Por fim, calculou-se a porcentagem da cobertura de plantas daninhas.

2.3. Mapeamento da porcentagem de cobertura de plantas daninhas

De posse dos valores de percentuais da cobertura das plantas daninhas e seus respectivos valores de coordenadas foram construídos quatro mapas com classes destes percentuais, sendo um mapa referente a cada tipo de imagem (NIR e RGB) em cada tipo de sistema de plantio (direto e convencional), utilizando técnicas de geoestatística por meio do *software* GS+ versão 9.0. A aplicação das técnicas geoestatísticas dos dados georreferenciados seguiu as seguintes etapas: estatística descritiva e exploratória, semivariograma, validação cruzada e krigagem.

A análise descritiva e exploratória dos dados precede a análise geoestatística, sendo importante para o desenvolvimento da modelagem espacial. Esta análise é muito sensível à presença de valores espúrios e à ausência de estacionariedade. O programa computacional utilizado na análise exploratória e descritiva foi o STATISTICA 7.

Por meio dos gráficos de caixa ("*box-plots*") foram determinados os valores discrepantes (*outliers* e extremos). Estes valores foram analisados para verificar se ocorreram erros de amostragem e, ou, processamento das imagens ou se realmente estes valores retratavam o fenômeno presente na área. Foram analisadas as medidas de dispersão, assimetria e curtose dos dados, e por fim o teste de normalidade de Shapiro Wilk (W). Valores de "*p value*" maiores que

o nível de significância de 5%, ($p > 0,05$) indicavam distribuição normal dos dados, do contrário os valores indicavam distribuição não normal dos dados.

Primeiramente foi calculada a semivariância para todos os pares de pontos possíveis para os resultados do percentual de cobertura das plantas daninhas de acordo com a equação 1.

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

em que $\gamma^*(h)$ é a semivariância estimada para distância h ; $N(h)$, número de pares de valores medidos; h , vetor que separa a posição das medições; $Z(x_i)$, valor da variável na posição x ; e $Z(x_i + h)$, valor da variável na posição $x+h$.

Com as semivariâncias calculadas, ajustou-se um modelo matemático teórico aos dados. Os modelos testados foram o gaussiano, o esférico e o exponencial. Por meio das análises do semivariograma e seus parâmetros (efeito pepita, alcance da dependência espacial e patamar), verificou-se a existência de dependência espacial do atributo porcentagem de cobertura de plantas daninhas na área em estudo.

O critério para escolha do melhor modelo baseou-se nos parâmetros obtidos pelo método de validação cruzada: coeficiente de correlação e o erro padrão. Portanto, o modelo escolhido foi o que obteve coeficiente de correlação mais próximo de 1 e erro padrão mais próximo de 0. Na etapa de validação cruzada, cada ponto medido é excluído e seu valor é estimado levando-se em conta os dados restantes.

O grau de dependência espacial foi obtido por meio do índice de dependência espacial (IDE) utilizando a relação $[(C/(C_0+C)) * 100]$ e classificado segundo Zimback (2001). Para $IDE < 25\%$ a dependência espacial é considerada como fraca, para $25\% \leq IDE < 75\%$ moderada e para $IDE \geq 75\%$ forte.

Após a análise da estrutura espacial das amostras das características avaliadas e definidos os modelos dos semivariogramas, iniciou-se a etapa da krigagem ordinária e elaboração dos mapas. A técnica de interpolação krigagem foi utilizada para atribuir valores aos pontos não amostrados na área

e possibilitar a geração dos mapas de variabilidade do atributo em questão. A krigagem fornece estimativas não tendenciosas e com a minimização do erro das variâncias para os pontos não amostrados.

2.4. Validação do sistema de visão artificial

Para validar o sistema realizou-se a captura de 100 imagens coloridas (RGB), com resolução espacial de aproximadamente 0,46 mm/pixel, que é superior a resolução das imagens utilizadas no sistema de visão artificial desenvolvido, dentro da área de estudo, em cada sistema de plantio, de forma aleatória. As imagens foram capturadas a uma altura de 1,60 m por uma câmera digital CASIO modelo EX-Z75, com dimensão de 2304(V) x 3072 (H) no formato JPEG (*Joint Photographic Experts Group*), sendo que a dimensão aproximada, retratada nas imagens foi de 1,07 x 1,42 m. O sensor das câmeras formadores das imagens foi o CCD no formato de 1/2,5". Já as coordenadas foram adquiridas utilizando o mesmo DGPS das amostras de construção dos mapas (*DGPS Trimble Pathfinder Pro XRS*). Cada imagem representou então um ponto com as coordenadas conhecidas e a este foi assumido o ponto central das imagens.

A Figura 4 apresenta uma representação dos pontos coletados pelo DGPS na área de estudo, sob o sistema de plantio direto e plantio convencional, para efetuar a validação do sistema.

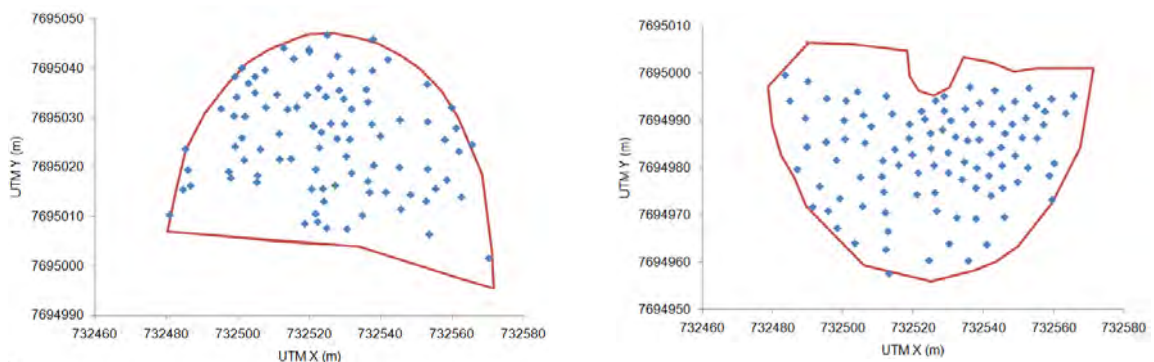


Figura 4 – Ilustração dos pontos para validação do sistema, amostrados na área de estudo sob plantio convencional e direto.

Estas imagens capturadas para validar o sistema foram processadas utilizando o mesmo programa de computador (LabView) e os mesmos algoritmos para transformação das imagens RGB em imagens índice ExG, para limiarização e aplicação das operações morfológicas de abertura e fechamento descritos anteriormente, neste mesmo capítulo. Entretanto, para se obter o percentual da cobertura de plantas daninhas, as linhas de cultura foram retiradas manualmente, contornando com o auxílio do mouse, as linhas de cultura, utilizando uma ferramenta disponível na tela do painel de controle deste algoritmo. A Figura 5 apresenta um exemplo desta aplicação, para retirar as linhas de cultura manualmente, pela tela do painel de controle do algoritmo desenvolvido.

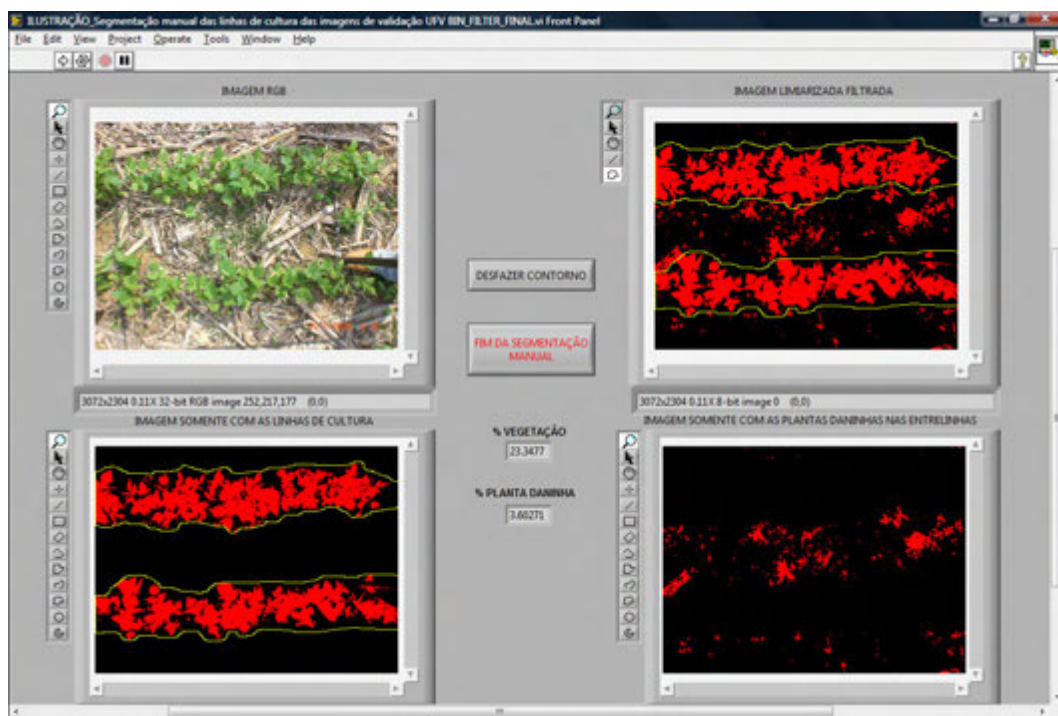


Figura 5 – Tela do painel de controle do algoritmo desenvolvido no LabView para retirar as linhas de cultura manualmente e determinar o percentual da cobertura de plantas daninhas.

Estes dados foram capturados no dia seguinte à captura com as câmeras acopladas no pivô, ou seja, 26 dias após a emergência (DAE) das plantas.

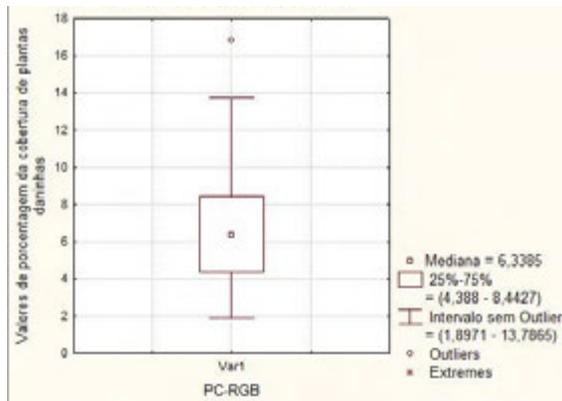
Como cada valor de porcentagem da cobertura de plantas daninhas obtido por este método de segmentação manual das linhas de cultura estava associado a um par de coordenadas (UTM X e Y), estas coordenadas então foram localizadas nos mapas já construídos, pelas câmeras RGB e NIR sob os sistemas de plantio direto e convencional, e os valores foram então comparados e correlacionados.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

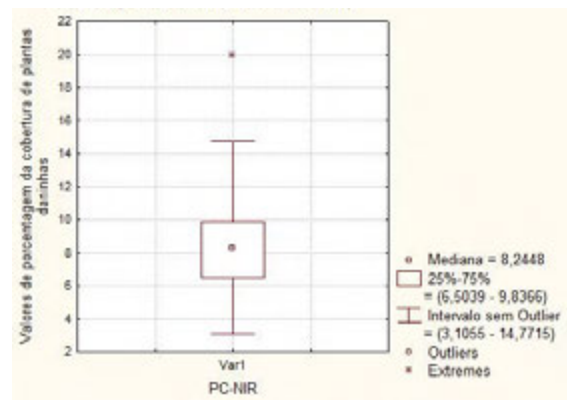
3.1. Estatística descritiva

Primeiramente foram construídos os gráficos de caixa (box plot), apresentados nas Figuras 6 e 7, para os valores de porcentagem da cobertura de plantas daninhas obtidos utilizando as câmeras RGB e NIR sob os sistemas de plantio convencional e direto.

Todos os valores discrepantes foram analisados para verificar se houve erro no processamento ou na captura das imagens e no cálculo da porcentagem da cobertura de plantas daninhas nas referentes imagens. Sendo assim, constatou-se que os valores discrepantes, presentes no gráfico de caixa referente às câmeras RGB e NIR em plantio convencional (Figuras 6a e 6b), eram referentes ao mesmo ponto (mesma área) e que este foi capturado em uma área infestada de plantas daninhas e, portanto podendo condizer com seus valores calculados. Entretanto, este ponto obteve um alto valor de cobertura de plantas daninhas rodeado de valores mais baixos, tendendo a ser considerado um ponto atípico. Mas, como foi confirmada a infestação pela conferência na imagem, este ponto não foi retirado das análises estatísticas e geoestatísticas. Se a amostragem dos dados fosse mais intensa, diminuiria as chances de pequenas reboleiras serem identificadas por poucos pontos ou somente um único ponto, favorecendo a distribuição normal dos dados.

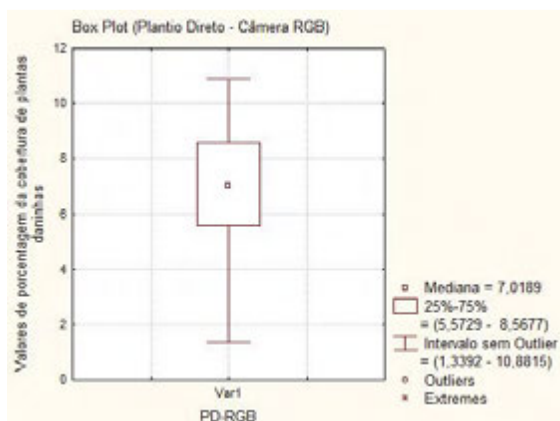


(a)

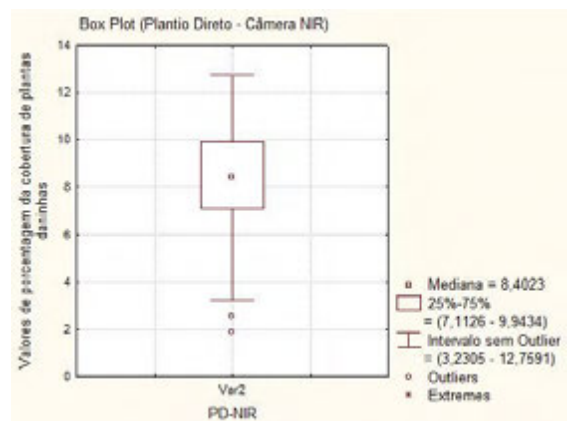


(b)

Figura 6 – Gráfico de caixa da distribuição dos valores de porcentagem da cobertura de plantas daninhas em plantio convencional utilizando a câmera RGB (a) e a câmera NIR (b).



(a)



(b)

Figura 7 – Gráfico de caixa da distribuição dos valores de porcentagem da cobertura de plantas daninhas em plantio direto utilizando a câmera RGB (a) e a câmera NIR (b).

Os valores discrepantes obtidos pela câmera NIR sob o sistema de plantio direto (Figura 7b) se referem a dois pontos presentes na linha de divisa entre os dois sistemas de plantio, onde havia pouca presença de plantas (cultura e daninhas), condizendo com os baixos valores calculados pelo processamento das imagens. Logo, estes pontos também não foram retirados das análises estatísticas e geoestatísticas.

A Tabela 1 apresenta o número total de valores de porcentagem da cobertura de plantas daninhas, e os valores discrepantes para as duas câmeras utilizadas, nos dois sistemas de plantio testados.

Tabela 1 – Número total dos valores de porcentagem da cobertura de plantas daninhas e os respectivos valores discrepantes para as câmeras RGB e NIR, sob os sistemas de plantio convencional e direto

	Número total dos valores de porcentagem da cobertura de plantas daninhas	Valores discrepantes
PC-RGB	75	1
PC-NIR	75	1
PD-RGB	82	0
PD-NIR	82	2

PC-RGB: plantio convencional e câmera RGB; PC-NIR: plantio convencional e câmera NIR; PD-RGB: plantio direto e câmera RGB; PD-NIR: plantio direto e câmera NIR; Valores discrepantes: outliers e extremos.

Os resultados obtidos pela análise da estatística descritiva para o percentual da cobertura das plantas daninhas nas entrelinhas são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Estatística descritiva e parâmetros da distribuição de freqüência dos valores de porcentagem da cobertura de plantas daninhas utilizando as câmeras RGB e NIR sob o sistema de plantio convencional e direto

	Média	Mediana	Mínimo	Máximo	CV%	s	Cs	Ck	W
PC-RGB	6,73	6,34	1,90	16,85	42,83	2,88	0,89	1,22	*
PC-NIR	8,49	8,24	3,11	19,92	35,54	3,02	0,79	1,83	*
PD-RGB	6,97	7,02	1,34	10,88	29,21	2,04	-0,47	0,15	ns
PD-NIR	8,33	8,40	1,87	12,76	28,02	2,33	-0,59	0,35	*

PC-RGB: plantio convencional e câmera RGB; PC-NIR: plantio convencional e câmera NIR; PD-RGB: plantio direto e câmera RGB; PD-NIR: plantio direto e câmera NIR; CV%: coeficiente de variação em porcentagem; s: desvio padrão; Cs: coeficiente de assimetria; Ck: coeficiente de curtose; W: teste de normalidade de Shapiro Wilk's; * distribuição não normal pelo teste de Shapiro Wilk's, a 5% de probabilidade; ns: distribuição normal pelo teste de Shapiro Wilk's, a 5% de probabilidade.

Os valores obtidos pela câmera RGB sob o sistema de plantio direto foram os únicos a obterem valor não significativo (ns), para o teste de normalidade de Shapiro Wilk (W), ao nível de 5% de significância, sendo, portanto distribuídos de forma normal ou gaussiana.

De acordo com Cressie (1993), a normalidade dos dados não é uma exigência da geoestatística, é conveniente apenas que a distribuição não apresente caudas muito alongadas, o que poderia comprometer as análises.

O coeficiente de curtose (Ck) que se refere ao grau de achatamento da distribuição de freqüência dos dados indicou tendências diferentes para a distribuição entre os sistemas de plantio. Os valores de Ck para o plantio convencional foram maiores que 1 levando a um alongamento da curva de distribuição (distribuição leptocúrtica). Para o sistema de plantio direto os valores de Ck foram próximos de zero, o que indica que a curva de distribuição tendeu a ser mesocúrtica (nem achatada nem alongada).

Observou-se também, que para todos os casos, os valores das medidas de tendência central (média e mediana) foram próximos, o que indica uma tendência dos dados a uma distribuição simétrica. Este fato também pode ser observado pelo coeficiente de assimetria (Cs) cujos valores foram próximos de zero.

Os coeficientes de variação (CV%) variaram de 28,02 a 42,83%. De acordo com a classificação proposta por Warrick e Nielsen (1980), os valores de CV menores que 12% indicam baixa variação dos dados, para valores de CV entre 12 e 60% os dados são classificados como de média variação e acima de 60% os valores de CV são considerados como de alta variação. Portanto, os valores de CV no presente estudo estão contidos dentro da faixa considerada como de média variação.

Os valores médios de porcentagem da cobertura de plantas daninhas calculados nas imagens NIR foram superiores aos das imagens RGB, independente do sistema de plantio. Este fato se deve à ineficiência que a câmera NIR teve em diferenciar planta do solo, gerando nas imagens uma superestimação dos *pixels* referentes a plantas durante o processamento.

A câmera NIR foi utilizada neste trabalho com intuito de aproveitar as vantagens dessa faixa do espectro quando os alvos são plantas, devido às plantas possuírem maior reflectância na faixa do infravermelho do que na faixa do visível (RGB). Entretanto, observou-se durante o processamento que as imagens índice ExG, foram mais eficientes na segmentação entre plantas e solo ou palhada. Em consequência disso, pode-se ter a diminuição do custo do SVA, pois as câmeras RGB são mais baratas e fáceis de encontrar no mercado do que as câmeras NIR, além de existir comercialmente em diversas marcas, tipos e modelos.

Com base nesta análise exploratória preliminar, assumiu-se que as distribuições podem ser consideradas suficientemente simétricas e com caudas não alongadas. Assumiu-se a ocorrência da estacionaridade necessária ao uso da geoestatística, em que a média e a variabilidade dos dados sejam constantes na área em estudo, tornando possível a construção de semivariogramas, com base nestas hipóteses.

3.2. Análise geoestatística e construção dos mapas

Na Tabela 3 são apresentados os modelos e parâmetros dos semivariogramas que melhor se ajustaram e os parâmetros da validação cruzada para os valores de porcentagem da cobertura de plantas daninhas

obtidos pelas câmeras RGB e NIR sob os sistemas de plantio convencional e direto.

Os valores obtidos pelas duas câmeras sob o sistema de plantio convencional ajustaram modelo esférico, isto indica que em intervalos pequenos de distância os dados tiveram tendência linear. Já os valores obtidos pelas câmeras RGB e NIR, referentes ao sistema de plantio direto, ajustaram modelo exponencial e gaussiano, respectivamente. O modelo gaussiano ajustado, devido à suavização de seu gráfico para pequenos valores de h , obteve maior continuidade entre os dados em pares de pontos próximos entre si, já o contrário aconteceu com o modelo exponencial ajustado.

As Figuras 8 e 9 apresentam os modelos de semivariogramas ajustados aos valores de porcentagem da cobertura de plantas daninhas, obtidos pelas câmeras RGB e NIR, sob os sistemas de plantio convencional e direto.

Os alcances foram de 20,80; 27,14; 22,50 e 54,04 m, respectivamente, para as câmeras RGB e NIR sob o sistema de plantio convencional e para as câmeras RGB e NIR em plantio direto. Estes valores de alcance não extrapolaram a distância máxima entre os pontos amostrados e nem foram inferiores a menor distância amostral, validando assim a grade amostral.

Segundo Silva (2009), os pontos localizados em uma área de raio menor ou igual ao alcance são mais similares e são dependentes espacialmente entre si e podem ser utilizados para estimar valores para locais não amostrados. Os valores de alcance também podem estar relacionados com a qualidade das estimativas, pois ele determina o número de valores a serem usados no processo de interpolação.

Tabela 3 – Modelos e parâmetros dos semivariogramas ajustados e parâmetros da validação cruzada, para os valores de porcentagem da cobertura de plantas daninhas, obtidos pelas câmeras RGB e NIR, sob os sistemas de plantio convencional e direto

		Modelos e parâmetros dos semivariogramas									Parâmetros da validação cruzada		
	Modelo	RBV (m)	NV	n	Efeito pepita (Co)	Patamar (Co+C)	Alcance (a)	R ²	IDE (%)	RSS	Coeficiente de regressão (CR)	R ²	SE
PC-RGB	Esférico	83,83	16	75	1,70	7,62	20,80	0,96	78	0,30	1,10	0,49	0,13
PC-NIR	Esférico	83,83	16	75	3,40	8,57	27,14	0,91	60	0,84	1,01	0,33	0,17
PD-RGB	Exponencial	85,82	8	82	0,95	3,99	22,50	0,75	76	0,54	1,01	0,23	0,21
PD-NIR	Gaussiano	85,82	8	82	3,28	7,01	54,04	0,95	53	0,71	0,87	0,28	0,16

PC-RGB: plantio convencional e câmera RGB; PC-NIR: plantio convencional e câmera NIR; PD-RGB: plantio direto e câmera RGB; PD-NIR: plantio direto e câmera NIR; RBV: raio de busca da vizinhança em metros utilizado no cálculo da krigagem ordinária, NV: número máximo de pontos vizinhos utilizados no cálculo da krigagem ordinária, n: número total de pontos que foram utilizados na análise geoestatística, a: alcance; IDE: índice de dependência espacial, RSS: soma dos quadrados dos resíduos, SE: erro padrão.

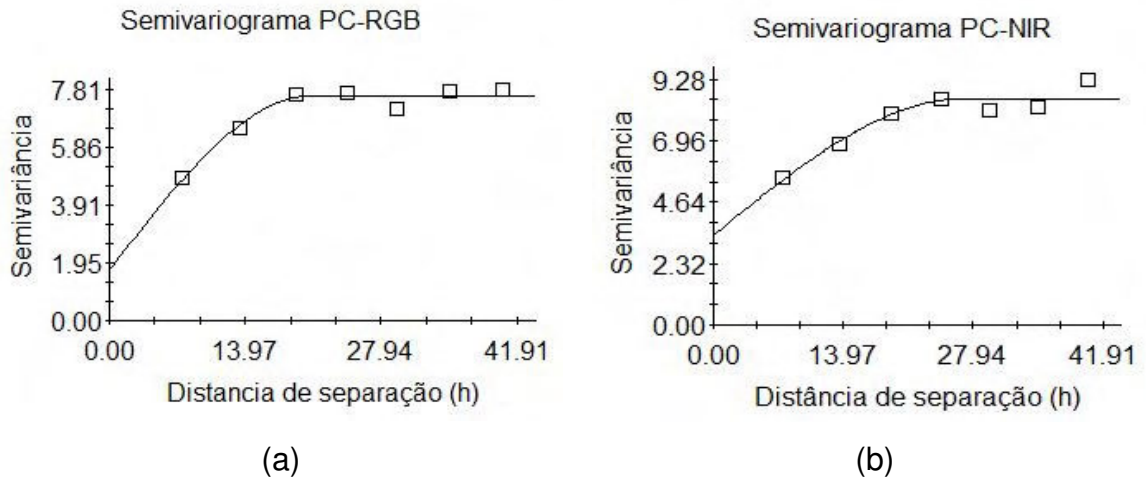


Figura 8 – Semivariograma ajustado aos valores de porcentagem da cobertura de plantas daninhas, utilizando a câmera RGB (a) e a câmera NIR (b), em plantio convencional, para a distância de separação (h) em metros.

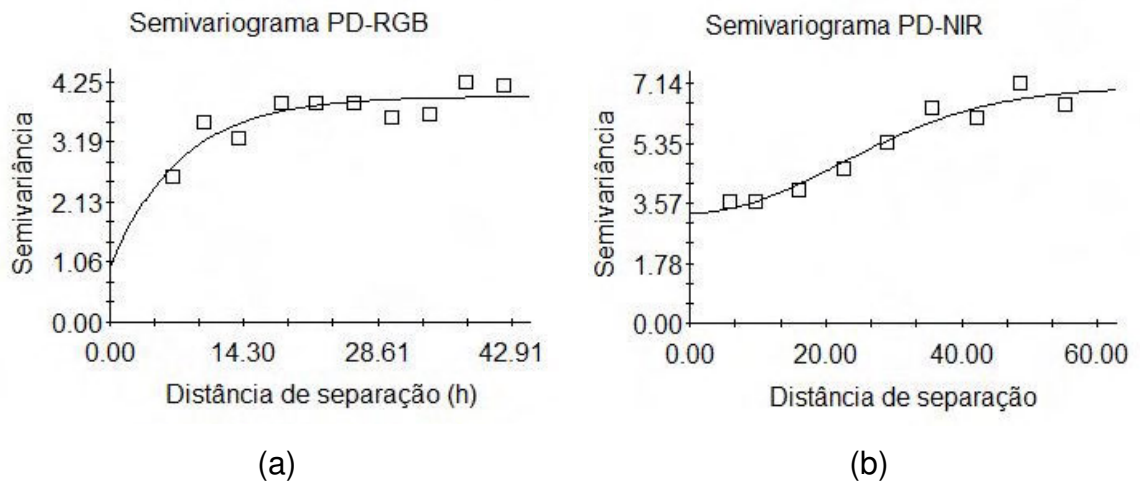


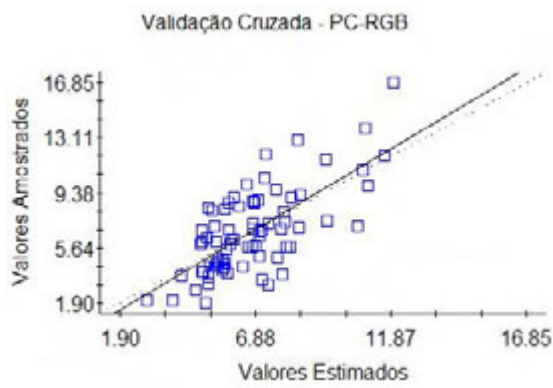
Figura 9 – Semivariograma ajustado aos valores de porcentagem da cobertura de plantas daninhas, utilizando a câmera RGB (a) e a câmera NIR (b), em plantio direto, para a distância de separação (h) em metros.

Com relação ao efeito pepita (Co), quanto menor este valor e mais próximo de zero mais precisão terá as estimativas, pois Co representa os erros de amostragem e erros de cálculo da variável, que causam essa descontinuidade na origem. Sendo assim, Co representa o componente da variabilidade espacial que não pode ser relacionado com uma causa específica, sendo esta variabilidade devido ao acaso e quanto menor a variação ao acaso mais precisa é a estimativa (VIEIRA, 2000). Os valores de Co referentes à câmera RGB, em ambos os sistemas de plantio testados, foram os menores e mais próximos de zero.

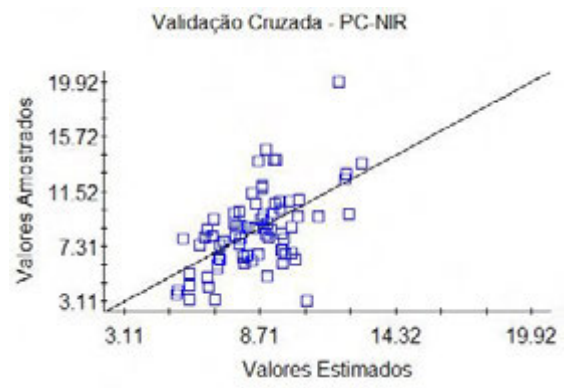
O índice de dependência espacial (IDE) indicou que, para os modelos ajustados aos valores obtidos pela câmera RGB, sob os dois sistemas de plantio, houve forte dependência; Por outro lado, para os modelos ajustados pela câmera NIR, em ambos os sistemas de plantio, a dependência espacial foi moderada, segundo a classificação proposta por Zimback (2001). Isto indica uma diferenciação no grau de dependência pela faixa espectral. De acordo com Vieira (1997), quanto maior for a proporção da variância estrutural (C) para o patamar (Co+C), maior será a semelhança entre os valores vizinhos e a continuidade do fenômeno e menor variância da estimativa. Com isso, aumenta-se a confiança nas estimativas de valores em locais não medidos pelo método de interpolação por krigagem ordinária.

Em geral, todos os valores de coeficiente de regressão (CR) foram próximos do valor 1, com destaque para os valores da câmera RGB em plantio direto e da câmera NIR em plantio convencional, que obtiveram valor de 1,01. Os valores de R^2 , em todos os casos, foram relativamente baixos (menores que 0,50), fato este ocasionado pela dispersão da nuvem dos pontos que representam os valores amostrados versus estimados.

As Figuras 10 e 11 apresentam os gráficos da validação cruzada. Estes gráficos apresentam a dispersão da nuvem dos pontos dos valores amostrados versus os valores estimados, bem como a reta de inclinação ideal onde os valores estimados são iguais aos amostrados e a reta tracejada que simboliza a reta de ajuste da nuvem dos pontos das câmeras RGB e NIR, sob os sistemas de plantio convencional e direto.

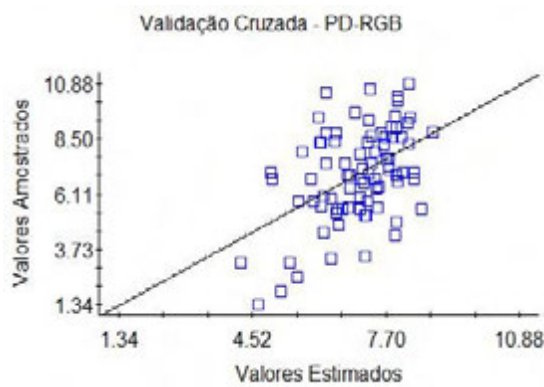


(a)

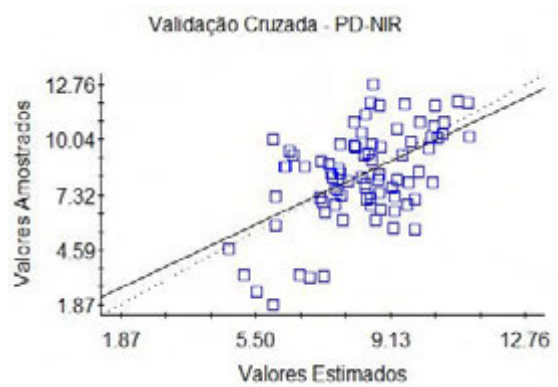


(b)

Figura 10 – Gráfico de validação cruzada referente à câmera RGB (a) e à câmera NIR (b), em plantio convencional.



(a)



(b)

Figura 11 – Gráfico de validação cruzada referente à câmera RGB (a) e à câmera NIR (b), em plantio direto.

A nuvem dos pontos dos valores amostrados versus estimados referentes às câmeras RGB e NIR, sob os sistemas de plantio convencional, estão mais agrupadas e mais próximas da reta ideal do que em relação aos valores das câmeras RGB e NIR em plantio direto. Isto indica que a estimação de valores para os pontos não amostrados, referentes ao plantio convencional, pode ter sido mais precisa do que as estimativas obtidas em plantio direto.

Baseado nos modelos de semivariância e levando-se em consideração os parâmetros ajustados, os dados em estudo foram interpolados por meio da krigagem ordinária para mapear a porcentagem da cobertura de plantas daninhas nas entrelinhas (Figuras 12 a 15). Estes mapas foram construídos com classes que variam de 5 em 5% em ambos sistemas de plantio e tipos de câmeras, sendo que os mapas do plantio convencional variaram de 0 a 20% e do plantio direto variaram entre 0 e 15%.

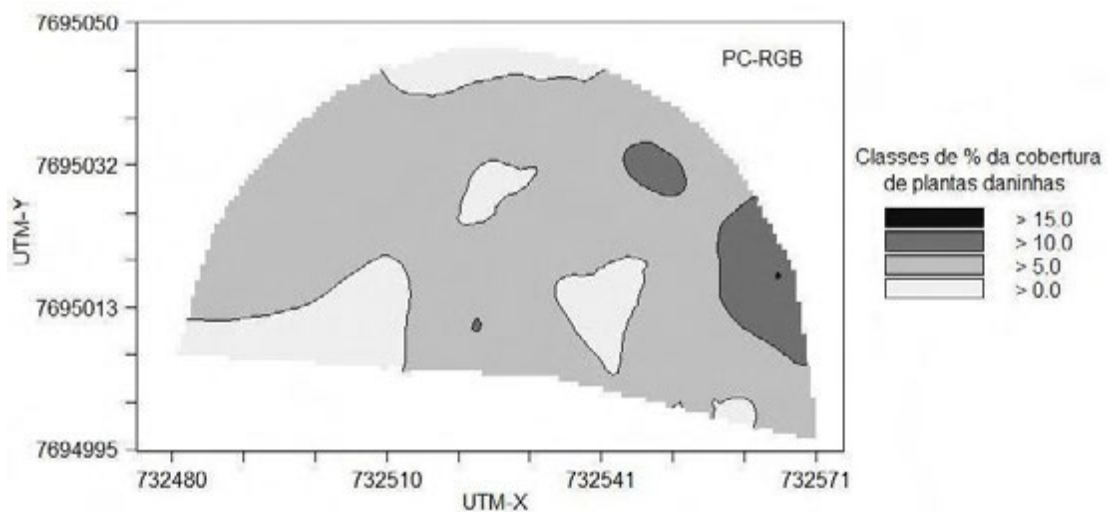


Figura 12 – Mapa de porcentagem da cobertura de plantas daninhas obtido pela câmera RGB na área sob o sistema de plantio convencional.

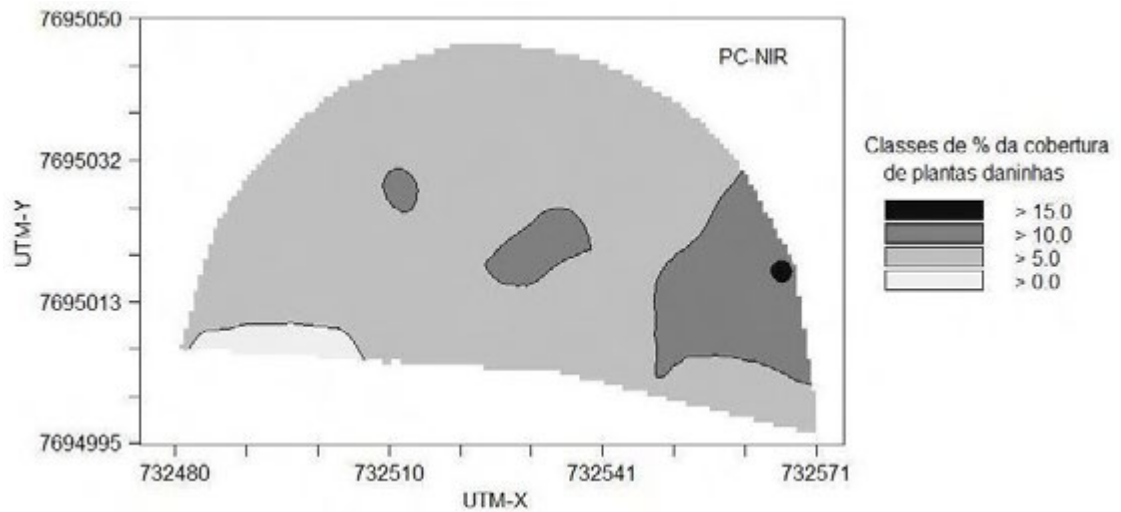


Figura 13 – Mapa de porcentagem da cobertura de plantas daninhas obtido pela câmera NIR na área sob o sistema de plantio convencional.

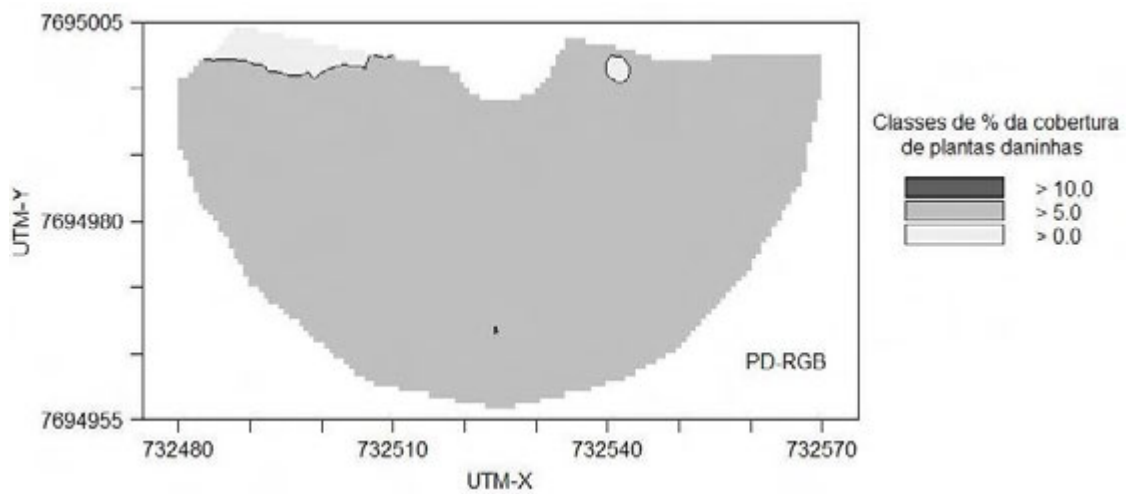


Figura 14 – Mapa de porcentagem da cobertura de plantas daninhas obtido pela câmera RGB na área sob o sistema de plantio direto.

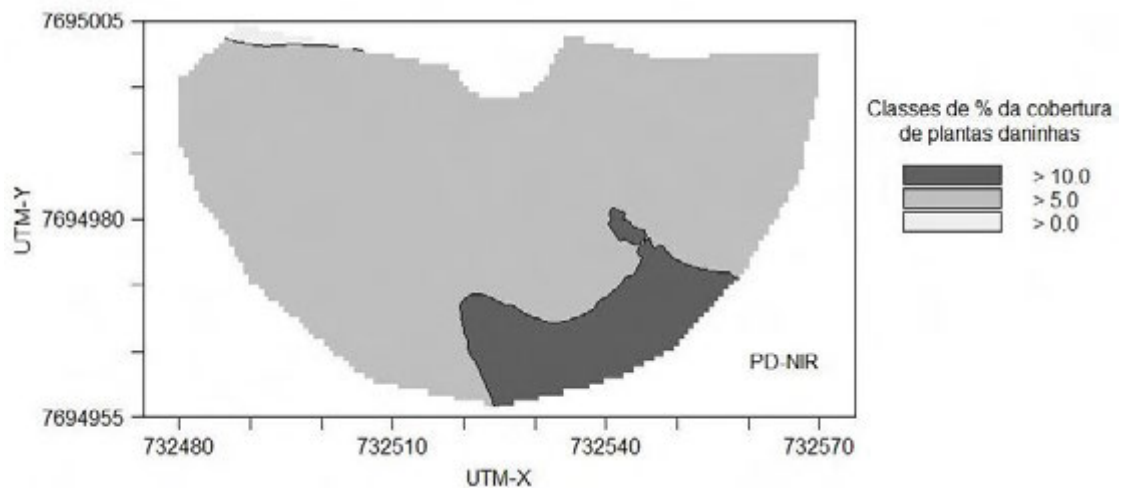


Figura 15 – Mapa de porcentagem da cobertura de plantas daninhas obtido pela câmera NIR na área sob o sistema de plantio direto.

Analisando os quatro mapas é possível observar que houve uma predominância da classe 5 a 10% de porcentagem da cobertura de plantas daninhas em todos os mapas.

Os mapas relativos ao sistema de plantio convencional apresentaram valores maiores de porcentagem da cobertura de plantas daninhas do que os mapas referentes ao sistema de plantio direto. Este fato foi observado em campo, onde se verificou áreas de maior infestação de plantas daninhas no sistema de plantio convencional do que no plantio direto. Além disso, também se comprovou uma maior variabilidade dos valores de porcentagem da cobertura de plantas daninhas ao longo da área sob plantio convencional, fato este constatado anteriormente pelos valores de alcance.

Em ambos os sistemas de plantio, percebeu-se que a faixa dos valores de porcentagem da cobertura de plantas daninhas dos mapas utilizando a câmera NIR foi maior que em relação aos da câmera RGB. Esse fato já foi abordado anteriormente pela análise da estatística descritiva e foi ocasionado por erros na segmentação das imagens, que no caso contribuíram para uma superestimação da cobertura das plantas.

No sistema de plantio direto obteve-se maior uniformidade da cobertura de plantas daninhas e as menores faixas de valores de porcentagem da

cobertura de plantas daninhas. Este fato já era esperado, visto que, o sistema de plantio direto tem como característica a minimização da infestação das plantas daninhas, pois a camada de palha presente neste sistema de plantio dificulta o nascimento destas plantas (MATEUS *et al.*, 2004; JAKELAITIS *et al.*, 2003).

Os mapas gerados pela câmera RGB tendem a ser mais confiáveis devido aos menores erros encontrados na avaliação do processamento das imagens, apresentados no capítulo 1, e também devido a estas imagens apresentarem um nível maior de detalhamento entre os objetos alvo da cena (cultura, plantas daninhas, solo ou palhada) do que as imagens NIR. Fato semelhante foi observado por Goel *et al.* (2003), onde em um estudo utilizando imagens aéreas nas faixas do visível (RGB) e do NIR para medir infestação de plantas daninhas e deficiência de nitrogênio, os autores constataram que a infestação de plantas daninhas não teve efeito significativo na detecção por imagens NIR.

3.3. Validação do sistema de visão artificial

Os gráficos das Figuras 16 e 17 apresentam os valores de porcentagem da cobertura de plantas daninhas obtidos pela câmera de maior resolução; com segmentação manual das linhas de cultura versus os valores de porcentagem da cobertura de plantas daninhas localizados nos mapas, estimados pelo SVA, com segmentação automática das linhas de cultura, utilizando as câmeras RGB e NIR em plantio convencional e direto.

Em relação ao plantio convencional, os valores obtidos pelas imagens da câmera de maior resolução, com segmentação manual das linhas de cultura, variaram de 1,26 a 23,68%, entretanto a maior parte destes valores se concentrou na faixa de 5,00 a 15,00%. Já os valores estimados pelo SVA, com segmentação automática das linhas de cultura, localizados no mapa construído pela câmera RGB variaram de 4,30 a 13,90% e pela câmera NIR de 5,20 a 14,30%, sendo que a maior parte destes valores se concentrou na faixa de 5 a 10%.

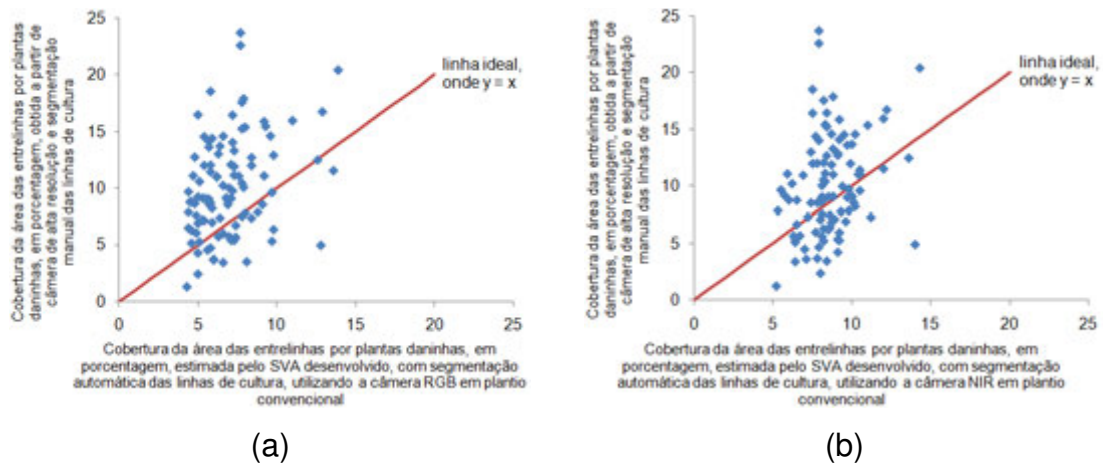


Figura 16 – Gráficos dos valores de porcentagem da cobertura de plantas daninhas obtidos pela câmera de maior resolução, com segmentação manual das linhas de cultura versus os valores localizados nos mapas, estimados pelo SVA, com segmentação automática das linhas de cultura, utilizando as câmeras (a) RGB e (b) NIR, sob o sistema de plantio convencional.

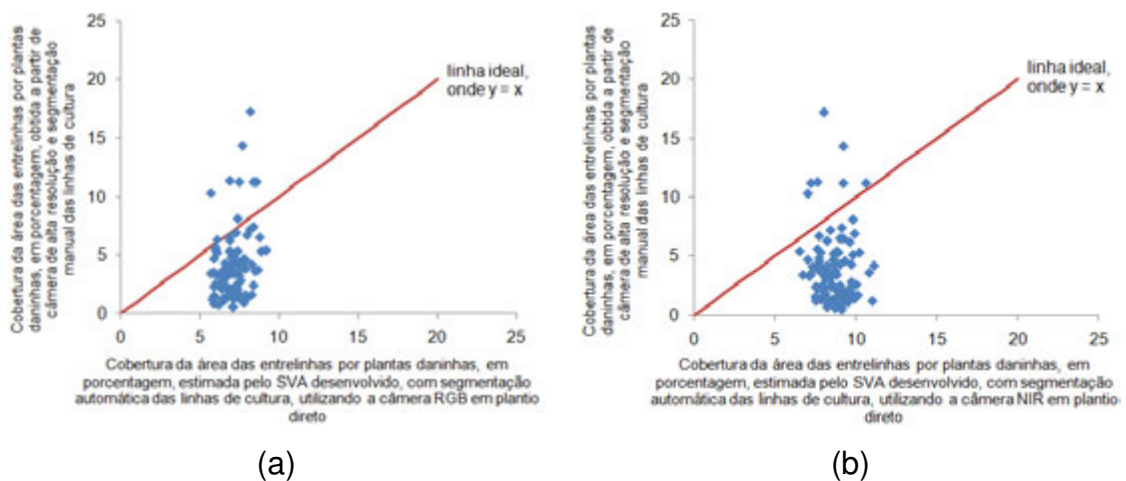


Figura 17 – Gráficos dos valores de porcentagem da cobertura de plantas daninhas obtidos pela câmera de maior resolução, com segmentação manual das linhas de cultura versus os valores localizados nos mapas, estimados pelo SVA, com segmentação automática das linhas de cultura, utilizando as câmeras (a) RGB e (b) NIR, sob o sistema de plantio direto.

Os valores obtidos pelas imagens da câmera de maior resolução, com segmentação manual das linhas de cultura, na área de plantio direto, apresentaram variação de 0,50 a 17,20%, sendo que a maior parte destes valores se concentrou na faixa de 0,00 a 10,00%. Os valores obtidos pelo SVA, no mesmo sistema de plantio, pela localização no mapa construído utilizando a câmera RGB, variaram de 5,7 a 9,2%, e utilizando a câmera NIR, variaram de 6,5 a 11,10%, com praticamente todos os valores se concentrando na faixa de 5 a 10%. Essas menores variações observadas neste sistema de plantio se devem a um fato, já abordado anteriormente, e proveniente a uma menor infestação e maior uniformidade das plantas daninhas encontrada nesta área, ocasionados pelo uso da camada de palhada sobre o solo.

Em ambos os sistemas de plantio houve uma maior variação dos valores atribuídos às imagens da câmera de maior resolução, com segmentação manual das linhas de cultura, do que os valores estimados pelo SVA, com segmentação automática das linhas de cultura, localizados nos mapas. Isto se deve à maior resolução espacial que estas imagens possuíam, levando a retratação de plantas daninhas bem pequenas nas imagens, favorecendo o aumento da respectiva cobertura.

Os gráficos demonstraram que, sob o plantio convencional, o SVA tendeu a subestimar os valores de porcentagem da cobertura de plantas daninhas, e em relação ao plantio direto, o SVA tendeu a superestimar. Em plantio convencional, tem-se um maior contraste entre solo e planta, e ao utilizar uma câmera com maior resolução espacial, plantas pequenas que não foram retratadas pelo processamento das imagens adquiridas pelo SVA, se destacaram nestas imagens de maior resolução, proporcionando um aumento do percentual da cobertura das plantas daninhas. Já, sob o sistema de plantio direto, a camada de palhada favoreceu bloqueio do aparecimento de pequenas plantas daninhas, e mesmo as que conseguiram romper esta camada puderam não ter sido destacadas pelo processamento do SVA, devido o menor contraste entre planta e palhada. Portanto, este fato contribuiu para que as imagens de alta resolução não apresentassem aumento do percentual da cobertura de plantas daninhas em relação às imagens do SVA. Sendo assim, o que se observou em plantio direto, foi que a maior parte dos valores da cobertura,

determinados pelo SVA, foram maiores do que os valores obtidos pelas imagens de alta resolução. Este fato provavelmente está atrelado aos erros gerados pela a segmentação automática das linhas de cultura do SVA, que podem ter tido mais influência nas imagens sob este sistema de plantio do que no plantio convencional.

A Tabela 4 apresenta os valores do coeficiente de correlação entre os valores de porcentagem da cobertura de plantas daninhas obtidos pelas imagens da câmera de maior resolução, com segmentação manual das linhas de cultura e os valores de porcentagem da cobertura de plantas daninhas localizados nos mapas construídos pelas câmeras RGB e NIR, sob os sistemas de plantio convencional e direto, com segmentação automática das linhas de cultura, utilizando o SVA.

Tabela 4 – Valores do coeficiente de correlação entre os valores de porcentagem da cobertura de plantas daninhas obtidos pelas imagens da câmera de maior resolução, com segmentação manual das linhas de cultura, e os valores de porcentagem da cobertura de plantas daninhas obtidos pela localização nos mapas construídos pelas câmeras RGB e NIR, sob os sistemas de plantio convencional e direto, com segmentação automática das linhas de cultura, utilizando o SVA

Valores do coeficiente de correlação	
PC-RGB	0,33
PC-NIR	0,28
PD-RGB	0,26
PD-NIR	-0,06

PC-RGB: plantio convencional e câmera RGB; PC-NIR: plantio convencional e câmera NIR;
PD-RGB: plantio direto e câmera RGB; PD-NIR: plantio direto e câmera NIR;

Os valores de correlação confirmam a baixa relação entre os valores obtidos pelas imagens da câmera de maior resolução, com segmentação manual das linhas de cultura e os valores encontrados em todos os mapas obtidos pelo SVA e utilizando segmentação automática das linhas de cultura, sendo que o máximo de relação foi de 33%.

Objetivou-se nesta etapa de validação obter valores de porcentagem da cobertura de plantas daninhas mais próximos da realidade em campo e analisar o quanto o SVA proposto foi eficiente. Entretanto, os resultados mostraram que os valores obtidos pelas imagens da câmera de maior resolução, com segmentação manual das linhas de cultura se diferenciaram dos valores obtidos pelos mapas construídos pelo SVA. As câmeras adotadas pelo SVA possuíam uma resolução espacial que não retratou determinados tamanhos de plantas. Isso pode prejudicar na informação do percentual da área infestada e acarretar problemas relacionados com a aplicação de herbicidas. Pois dependendo das espécies de plantas daninhas presentes na área, estas têm que ser rapidamente controladas. Portanto, torna-se necessário efetuar uma inspeção visual em campo para se ter conhecimento das espécies de plantas daninhas presentes na área e a partir daí ajustar a resolução espacial para que informações importantes não sejam perdidas.

O mapeamento do percentual da cobertura de plantas daninhas, apenas informam áreas com maiores e menores coberturas de plantas daninhas, entretanto estas informações por si só, não serve para tomar a decisão de aplicar ou não herbicidas. Além do que, na aplicação de herbicidas tem que ser levado em conta outros fatores como a cultura implantada, o estágio de crescimento da cultura e das plantas daninhas, e principalmente, as espécies de plantas daninhas presentes e/ou dominantes na área e o perigo que cada espécie oferece. Com isso, inicialmente, uma inspeção visual em campo promove uma análise das espécies de plantas daninhas presentes e predominantes na área e de posse dessa prévia informação, o percentual da cobertura pode auxiliar na decisão da aplicação ou não de uma área específica.

O mapeamento da cobertura de plantas daninhas, proposto neste SVA, pode ser útil no monitoramento do crescimento das plantas daninhas, após

uma aplicação de herbicidas pré-emergente. A partir daí pode ser realizada uma análise da eficácia desta pulverização, facilitando a localização de áreas específicas em que o controle das plantas daninhas não surtiu efeito.

4. CONCLUSÕES

Por meio de imagens digitais e técnicas de processamento de imagens e de geoestatística foi possível mapear o percentual da cobertura de plantas daninhas nas entrelinhas.

As técnicas de geoestatística utilizadas possibilitaram o ajuste de modelos adequados aos dados e a construção de mapas de porcentagem da cobertura de plantas daninhas nos dois tipos de sistemas de plantio (direto e convencional) e com as duas câmeras (RGB e NIR) estudadas.

As imagens RGB foram as mais indicadas para mapear a porcentagem da cobertura de plantas daninhas nas entrelinhas para ambos os sistemas de plantio, pois apresentaram melhor contraste entre plantas e solo ou palhada em relação às imagens NIR.

O sistema de plantio direto proporcionou menores erros no processamento das imagens em ambas as câmeras utilizadas e maior uniformidade da cobertura de plantas daninhas.

5. REFERÊNCIAS

ANTUNIASSI, U.R. Agricultura de precisão: aplicação localizada de agrotóxicos. In: **TECNOLOGIA E SEGURANÇA NA APLICAÇÃO DE AGROTÓXICOS**, 1998, Santa Maria. **Anais...** Santa Maria: UFSM, 1998. p. 53-63.

BALASTREIRE, L.A.; BAILO, F.H.R. Avaliação de uma metodologia prática para o mapeamento de plantas daninhas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 5, n. 2, p. 349-352, 2001.

CONCENÇO, G.; LOPES, N.F.; ANDRES, A.; MORAES, D.M.; SANTOS, M.Q.; RIEFFEL FILHO, J.A.; VILELLA, J.V. Controle de plantas daninhas em arroz irrigado em função de doses de herbicidas pré-emergentes e início da irrigação. **Planta Daninha**, v. 24, n. 2, p. 303-309, 2006.

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

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Disponível em: <http://www.embrapa.br/linhas_de_acao/alimentos/prod_animal/index_html/mostra_documento>. Acesso em: 14 mar. 2009.

GOEL, P.K.; PRASHER, S.O.; LANDRY, J.A.; PATEL, R.M.; BONNELL, R.B.; VIAU, A.A.; MILLER, J.R. Potential of airborne hyperspectral remote sensing to detect nitrogen deficiency and weed infestation in corn. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 38, p. 99-124, 2003.

JAKELAITIS, A.; FERREIRA, L.R.; SILVA, A.A.; AGNES, E.L.; MIRANDA, G.V.; MACHADO, A.F.L. Efeitos de sistemas de manejo sobre a população de tiririca. **Planta Daninha**, v. 21, n. 1, p. 89-95, 2003.

KOZLOWSKI, L.A.; RONZELLI JÚNIOR, P.; PURISSIMO, C.; DAROS, E.; KOEHLER, H.S. Período crítico de interferência das plantas daninhas na cultura do feijoeiro-comum em sistema de semeadura direta. **Planta Daninha**, v. 20, n. 2, p. 213-220, 2002.

LAMB, D.W.; BROWN, R.B. Remote sensing and mapping of weeds in crops. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 78, p. 117-125, 2001.

MACHADO, A.F.L.; CAMARGO, A.P.M.; FERREIRA, L.R.; SEDIYAMA, T.; FERREIRA, F.A.; VIANA, R.G. Misturas de herbicidas no manejo de plantas daninhas na cultura do feijão. **Planta Daninha**, v. 24, n. 1, p. 107-114, 2006.

MATEUS, G.P.; CRUSCIOL, C.A.C.; NEGRISOLI, E. Palhada do sorgo de guiné gigante no estabelecimento de plantas daninhas em área de plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 39, n. 6, p. 539-542, 2004.

PIERCE, F.J.; NOWAK, P. Aspects of precision agriculture. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 67, p. 1-85, 1999.

SARTORI, L.R.; IMAI, N.N.; GALO, M.L.B.T. Utilização da resposta espectral para discriminação de plantas daninhas em áreas de plantação de café. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 2005, Goiânia. **Anais...** Goiânia: INPE, 2005. p. 4303-4310.

SENAY, G.B.; WARD, A.D.; LYON, J.G. Manipulation of high spatial resolution aircraft remote sensing data for use in site-specific farming. **Transactions of the ASAE**, v. 41, n. 2, p. 489-495, 1998.

SHIRATSUCHI, L.S.; CHRISTOFFOLETI, P.J. Aplicação localizada de herbicidas em pós-emergência na cultura de soja. **Planta Daninha**, v. 20, n. 1, p. 71-76, 2002.

SILVA, S.A. **Variabilidade espacial de atributos de solo e folhas em lavouras de café arábica utilizando análise multivariada e geoestatística**. 2009. 106 f. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) – Universidade Federal do Espírito Santo, Alegre, ES.

VIEIRA, S.R. Variabilidade espacial de argila, silte e atributos químicos em uma parcela experimental de um Latossolo roxo de Campinas (SP). **Bragantia**, Campinas, v. 56, n. 1, p. 1-13, 1997.

VIEIRA, S.R. Geoestatística aplicada à agricultura de precisão. In: BORÉM, A.; GIUDICE, M.P.; QUEIROZ, D.M.; MANTOVANI, E.C.; FERREIRA, L.R.; VALLE, F.X.R.; GOMIDE, R.L. (Eds.). **Agricultura de precisão**. Viçosa: UFV, 2000. p. 93-108.

WARRICK, A.W.; NIELSEN, D.R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D. (Ed.). **Applications of soil physics**. New York: Academic Press, 1980. p. 319-344.

ZIMBACK, C.R.L. **Análise espacial de atributos químicos de solos para fins de mapeamento da fertilidade do solo**. 2001. 114 f. Tese (Livre Docência) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, SP.

CAPÍTULO 3

MAPEAMENTO DA COBERTURA DE PLANTAS DANINHAS NA CULTURA DO GIRASSOL UTILIZANDO UM SISTEMA DE VISÃO ARTIFICIAL (SVA)

1. INTRODUÇÃO

O girassol é uma cultura com característica de se adaptar às diversas condições climáticas. Nos últimos anos, vem se apresentando como opção de rotação e sucessão de culturas nas regiões produtoras de grãos, além de ser utilizado para extração de óleo, sendo considerado como um dos óleos vegetais de melhor qualidade nutricional e organoléptica (aroma e sabor) (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA, 2010). De acordo com os mesmos autores, o girassol também vem conquistando os produtores brasileiros, por possuir melhor tolerância à seca do que o milho e o sorgo e baixa incidência de pragas e doenças.

Segundo Brighenti *et al.* (2004), os estados brasileiros que mais se destacam na produção de girassol são Goiás, Rio Grande do Sul, Mato Grosso do Sul, Mato Grosso, São Paulo, Minas Gerais e Paraná. Os mesmos autores citam que com a expansão do cultivo de girassol nestes Estados, os problemas com plantas daninhas têm aumentado significativamente e os prejuízos causados podem variar de 23 a 70% de perda de rendimento.

Para controlar o surgimento e a proliferação das plantas daninhas diversos métodos e técnicas podem ser utilizados, entretanto, ultimamente devido a escassez e o alto custo de mão de obra no meio rural e em razão da eficiência e do tamanho da área cultivada, a aplicação de herbicidas vem se tornando o método de controle de plantas daninhas mais indicado (BRIGHENTI *et al.*, 2002).

A aplicação de herbicidas, que convencionalmente é praticada pelos agricultores, ocorre pulverizando o produto químico uniformemente por toda a área, independente da não existência de plantas daninhas em algumas regiões. Portanto, esta prática gera desperdício dos produtos aplicados e conseqüentemente gastos desnecessários na produção, além de poder contaminar o meio ambiente. Segundo Tellaeché *et al.* (2008), para diminuir problemas como este e efetuar a otimização da produção agrícola as técnicas da agricultura de precisão surgem como valiosas ferramentas.

A agricultura de precisão é uma tecnologia em desenvolvimento que se apresenta como alternativa à agricultura convencional. Pode ser considerada como um sistema de gerenciamento a sítio específico da atividade agrícola com base em informações de mapas que contém a variabilidade espacial e, ou, temporal da produção e dos fatores a ela relacionados. Seu objetivo é aumentar a eficiência do processo produtivo (QUEIROZ *et al.*, 2000). Neste sistema, as decisões são tomadas com base no requerimento de pequenas subdivisões homogêneas da área total. Cada subdivisão é tratada conforme suas necessidades específicas, desta forma o desperdício e o impacto ambiental produzido pela agricultura são minimizados (YANG; ANDERSON, 1999).

Para que a agricultura de precisão possa ser implantada com sucesso, necessita-se de um maior número possível de informações, informações essas sobre a variabilidade espacial e/ou temporal dos fatores de produção, como, fertilidade de solo, teor nutricional, variedades de cultura, pragas, infestação de plantas daninhas, entre outros. Sendo assim, descobrindo a variabilidade espacial das plantas daninhas e efetuando-se o mapeamento deste atributo torna-se possível a aplicação de defensivos agrícolas somente nos alvos desejados. De acordo com Shiratsuchi e Christoffoleti (2002), vários

experimentos já demonstraram que a aplicação localizada de herbicidas é mais econômica que a aplicação convencional.

Dentre os diversos métodos disponíveis para efetuar o mapeamento de plantas daninhas, as técnicas de sensoriamento remoto vem se destacando, devido às vantagens de extrair informações por imagens digitais, de forma rápida e precisa (LAMB; BROWN, 2001).

Segundo Meneses (2001), o sensoriamento remoto pode ser definido, de maneira simples e usual, como uma técnica de aquisição de informações dos objetos existentes na superfície terrestre, sem que haja contato físico direto com o mesmo. Essas informações podem ser adquiridas em níveis: terrestre, suborbital e orbital, de acordo com a distância entre o objeto de interesse e o sensor.

Outro fato que favorece a aplicação do sensoriamento remoto é a popularização das câmeras digitais e versatilidade de seu uso, podendo ser instaladas nas mais diversas plataformas, aviões, balões, aeromodelos rádio-controlados ou em veículos que circulam sobre o campo a ser mapeado como as máquinas agrícolas (ANTUNIASSI, 1998). Sendo assim, é possível obter a retratação de toda a área por meio de imagens digitais e a partir destas imagens mapear a variabilidade espacial das plantas daninhas bem como a de outros atributos.

Segundo Sartori *et al.* (2005), com a utilização das técnicas de processamento e análise de imagens por meio dos modelos de cores RGB, é possível extrair informações importantes da imagem favorecendo a identificação de cultura e plantas daninhas. Os mesmos autores citam que o uso de índices espectrais pode auxiliar no mapeamento de plantas, pois minimizam variações de fatores externos e promovem o realce dos objetos de interesse.

Sistemas utilizando câmeras digitais e processamento de imagens, também chamado de sistemas de visão artificial, podem atuar no mapeamento capturando imagens que retratam toda a área de estudo ou imagens que representam apenas amostras da área. Entretanto, para construir mapas por meio de amostragem na área, é necessário utilizar ferramentas capazes de atribuir valores aonde não se capturou informações. Estas ferramentas fazem

uso da estatística espacial ou geoestatística, a qual interpola valores onde não se conhece, baseando-se em modelos estatísticos e nos valores da vizinhança, possibilitando assim analisar e deduzir os valores de uma variável distribuída no espaço.

A implementação de técnicas de manejo para aplicação localizada de defensivos agrícolas pode auxiliar os agricultores na otimização de sua produção, melhorando sua qualidade e reduzindo futuros problemas ambientais.

Dessa maneira, objetivou-se com este trabalho utilizar um sistema de visão artificial (SVA) para mapear o percentual da cobertura de plantas daninhas nas entrelinhas utilizando técnicas de processamento de imagens digitais e de geoestatística.

2. MATERIAL E MÉTODOS

O presente trabalho foi conduzido em uma área de propriedade particular de Francisco Javier Gómez Gil, de aproximadamente 1,2 hectares, localizada em Aguilar de Bureba na Província de Burgos, Espanha. Esta área foi cultivada com girassol, sob o sistema de plantio convencional, sem nenhum sistema de irrigação.

2.1. Sistema de visão artificial

O sistema de visão artificial (SVA) era constituído de duas câmeras, uma da marca Marlin, modelo F-131C colorida, e a outra câmera, também colorida, era da marca Sony modelo Cyber-shot DSC-W120 de 7.2 megapixels. Também faziam parte do SVA um GPS da marca Haicon, modelo HI-204III-USB e um microcomputador portátil.

A câmera Marlin foi conectada a um microcomputador portátil por meio de um cabo conectado em uma placa de aquisição de imagens PCMCIA IEEE 1394, que fez a interface das câmeras com o microcomputador. Para o funcionamento das câmeras foi utilizada uma bateria externa de 12 Vcc conectada à placa. O padrão da lente utilizada foi o C-mount com a distância focal de 6 mm e as imagens foram salvas no formato TIFF (Tagged Image File Format) com dimensão de 1024(V) x 1280(H) pixels. O sensor das câmeras,

formador das imagens, foi o imageador CMOS no formato de 2/3" com as dimensões de 6,9 x 8,6 mm. O GPS foi conectado a uma porta serial USB do microcomputador. Tanto para a configuração e controle da câmera Marlin e do GPS, quanto para a aquisição das imagens desta câmera e das coordenadas foi utilizado o *software* LabView, versão 8.6.

A câmera Sony Cyber-shot possui *software* próprio para a aquisição das imagens e ajuste de alguns de seus parâmetros, logo, para efetuar a aquisição de imagens nesta câmera foi necessário efetuar o disparo manualmente, por pressionamento de um botão da câmera. A alimentação desta câmera é realizada por uma bateria de lítio, recarregável, com capacidade de duração para aquisição aproximada de 380 fotos. O tipo das lentes utilizadas foi a Carl Zeiss Vario-Tessar com a distância focal de 5,35 mm. As imagens foram salvas no formato JPEG (Joint Photographic Experts Group) com dimensão de 2304(V) x 3072(H) *pixels*. O sensor das câmeras formadores das imagens foi o CCD super HAD no formato de 1/2,5".

A aquisição dos dados ocorreu de forma automática e manual. A aquisição automática foi realizada por meio de um algoritmo desenvolvido no *software* LabView, que promovia a captura simultânea de imagens da câmera Marlin e de coordenadas pelo GPS ao longo da área na distância desejada. Já a forma manual ocorreu na captura de imagens pela câmera Cyber-shot, pois esta câmera além de não possuir um disparador automático, não tinha como ser comandada por um *software*. Sendo assim, no algoritmo de aquisição automática foi construída uma função que informava o momento da captura de imagens da câmera Marlin na tela de visualização do painel de controle, da parte de aquisição dos dados (capítulo 1), por um sinal luminoso de um led indicador, podendo este ser visualizado na Figura 5 do capítulo 1. Ao acender o led, o botão de disparo da câmera Cyber-shot era pressionado manualmente e a imagem era adquirida.

As duas câmeras capturaram imagens coloridas, que contém as bandas R (vermelho), G (verde) e B (azul), porém com resoluções espaciais e espectrais diferentes.

Estas câmeras foram posicionadas lado a lado na pá de um trator, para simular a altura de um pivô central, tendo suas lentes voltadas para baixo,

focalizando o alvo (linhas de cultivo e entrelinhas). O GPS também foi posicionado na pá do trator, acima e na direção das câmeras, de forma que as coordenadas capturadas possam ser atribuídas ao ponto central das imagens e também que não ocorra obstrução do sinal recebido pelos satélites. A Figura 1 ilustra este sistema SVA desenvolvido.



Figura 1 – Sistema de visão artificial com as câmeras, microcomputador e o GPS, acoplados na pá do trator, em operação pela área em estudo.

O trator percorria por toda a área em estudo, seguindo o sentido das linhas de cultura, fazendo com que o SVA adquirisse imagens e coordenadas ao longo de todo o percurso.

Os dados foram capturados aos 37 e 46 dias após o plantio (DAP) com as câmeras posicionadas a 3 e 4 m de altura em ambos DAP.

A dimensão retratada nas imagens, obtidas pela câmera Marlin, foi de 4,10 x 5,12 m, com resolução espacial de aproximadamente 4,0 mm/*pixel*, para a altura de 3 m de posicionamento das câmeras, e 5,20 x 6,50 m, com resolução espacial de aproximadamente 5,08 mm/*pixel*, para a altura de 4 m. Já para a câmera Cyber-shot, as dimensões retratadas nas imagens, capturadas a 3 e 4 m de altura, foram de 2,39 x 3,21 m, com resolução espacial de aproximadamente 1,04 mm/*pixel* e 3,20 x 4,28 m, com resolução espacial de aproximadamente 1,39 mm/*pixel*, respectivamente.

As distâncias entre os pontos amostrados foram 6 e 8 m, respectivamente, para as alturas de 3 e 4 m aos 37 DAP, e 6,30 e 7 m, respectivamente, para 3 e 4 m de altura aos 46 DAP. Os valores das distâncias entre os pontos amostrados foram escolhidos de acordo com a altura das câmeras, para que pudesse ser capturado um grande número de imagens e que não houvesse sobreposição entre elas. A Figura 2 apresenta uma representação dos pontos coletados pelo GPS a 3 m de altura e 6 m distância entre os pontos na área em estudo.

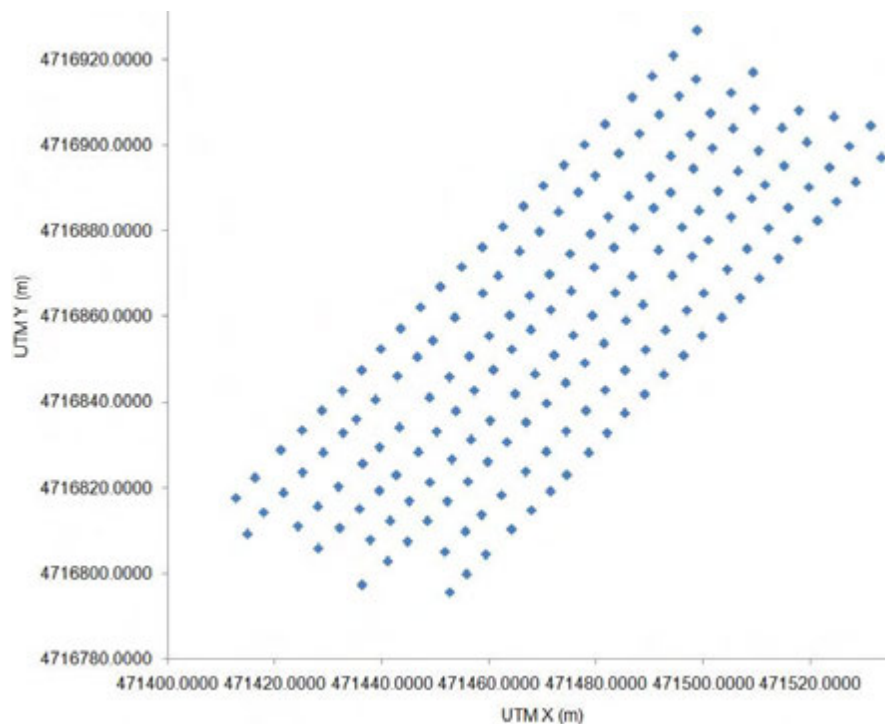


Figura 2 – Ilustração dos pontos amostrados na área de estudo a 3 m de altura com 6 m distância entre os pontos.

Aos 37 DAP, com as câmeras posicionadas a 3 m de altura e com a distância entre pontos ajustada para 6 m, capturou-se um total de 184 imagens pela câmera Marlin e 119 imagens pela câmera Cyber-shot. Essa diferença no número de imagens se deve a problemas ocorridos no momento da captura, visto que o disparo na Cyber-shot era manual e as vezes não ocorria corretamente. Neste mesmo DAP, mas operando com as câmeras a 4 m de altura e com a de distância entre pontos ajustada para 8 m foram obtidos 120 imagens pela câmera Marlin e 103 imagens pela Cyber-shot. Já aos 46 DAP foram capturadas a 3 m de altura e 6,30 m de distância entre pontos 176 imagens pela câmera Marlin e 173 imagens pela Cyber-shot, e a 4 m de altura com 7 m de distância entre pontos, 160 imagens pela câmera Marlin e 159 pela Cyber-shot.

Cada imagem então obteve um ponto com as coordenadas conhecidas e a este foi assumido o ponto central das imagens.

Todas as imagens foram adquiridas em condições de céu aberto no período de 10 às 14 horas.

2.2. Processamento e análise de imagens

As etapas do processamento das imagens realizado pelo SVA, para efetuar o cálculo da porcentagem da cobertura de plantas daninhas estão apresentadas no fluxograma da Figura 3.

As etapas de transformação das imagens RGB para imagem índice ExG, limiarização, aplicação das operações morfológicas, segmentação das linhas de cultura e cálculo da porcentagem da cobertura de plantas daninhas são as mesmas que foram detalhadas no capítulo 1 e também utilizadas no capítulo 2. Entretanto, como neste trabalho as imagens foram capturadas seguindo o sentido das linhas de cultura, estas estavam sempre posicionadas verticalmente nas imagens, não havendo a necessidade de identificação do ângulo de inclinação das linhas de cultura, pela transformada de Hough, e nem a rotação das imagens como apresentado no capítulo 2.

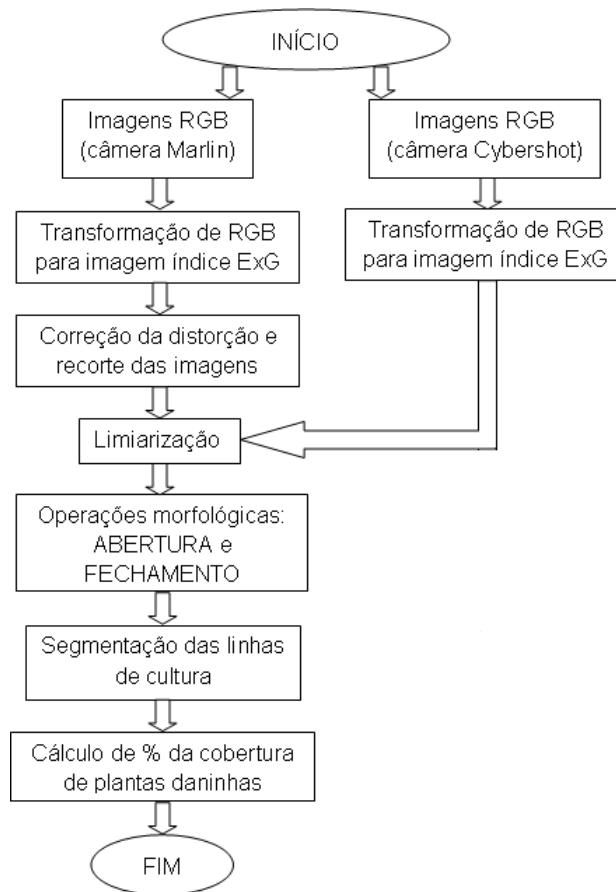


Figura 3 – Fluxograma das etapas do processamento de imagens para cálculo da porcentagem de cobertura das plantas daninhas.

A câmera “Marlin” utilizada proporcionou uma distorção nas imagens, causando um abaulamento nas linhas de cultura, sendo que este efeito obteve maior intensidade nos extremos das imagens. Sendo assim, foi necessário criar um algoritmo capaz de corrigir este efeito de distorção nas imagens e, para isso, também foi utilizado programa de computador LabView. A execução desta etapa pode ser visualizada pelo exemplo na tela do painel de controle da Figura 4, onde uma imagem ExG distorcida, sofreu o processo de correção utilizando uma imagem padrão, e que ao final gerou a imagem ExG corrigida.

Este algoritmo trabalhava da seguinte maneira, primeiramente capturava-se uma imagem de um padrão, fornecido pela própria National Instruments junto com o *software* LabView, utilizando a mesma câmera Marlin. Esse padrão era composto por uma malha regular de pontos pretos de mesmo tamanho, em um fundo branco, com raio de 2 mm e distância centro a centro de pontos vizinhos na vertical e horizontal de 1 cm, como ilustra a Figura 5.

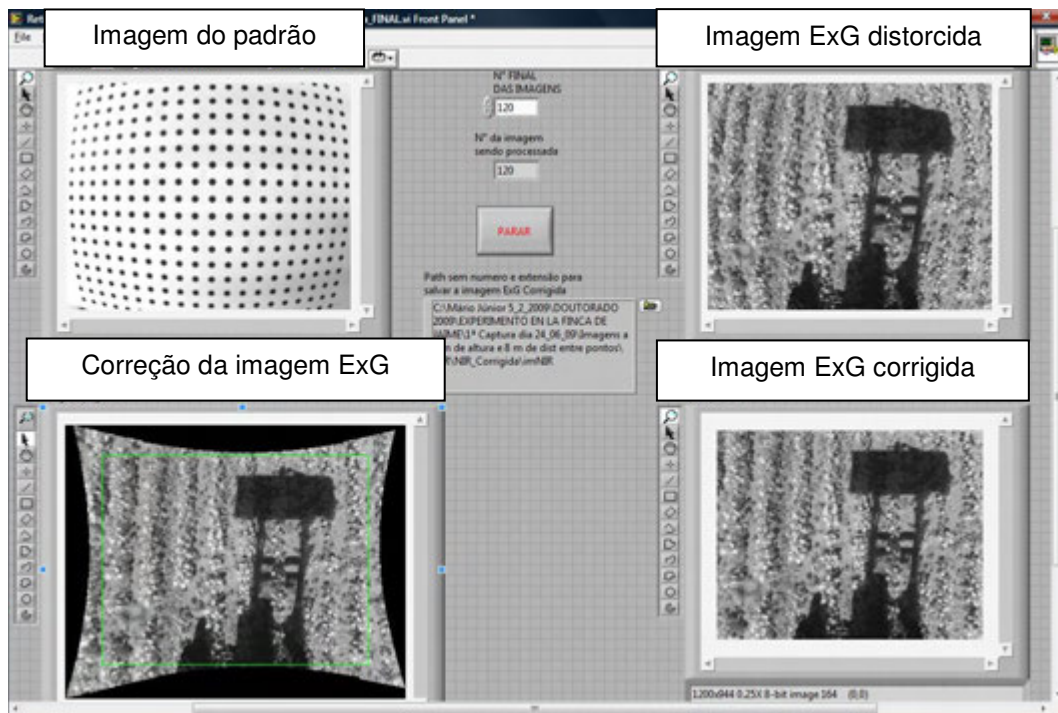


Figura 4 – Tela do painel de controle do algoritmo desenvolvido no LabView para corrigir a distorção das imagens da câmera Marlin.

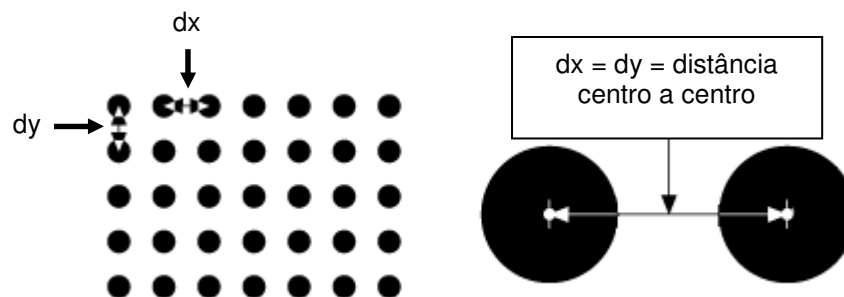


Figura 5 – Representação do padrão utilizado na etapa de correção da distorção das imagens.

Ao capturar a imagem do padrão, a malha tinha que estar completamente inserida em toda área da imagem, como pode ser visualizado pela Figura 4.

O algoritmo desenvolvido utilizava toda essa informação da malha de pontos do padrão original, para descobrir em cada ponto preto na imagem do

padrão, o seu correspondente número de *pixels*, raio e as distâncias centro a centro entre os vizinhos. A partir daí, era possível descobrir o nível da distorção em cada ponto da imagem.

Com isso, o próximo passo nesta etapa de correção era inserir a imagem distorcida que se desejava corrigir no algoritmo, e utilizar toda a informação do nível de distorção em cada ponto da imagem do padrão, para efetuar a correção da imagem, com o auxílio da interpolação bilinear dos valores dos *pixels*.

O processo de correção das imagens gera deformações nas laterais da imagem e quinas alongadas, portanto para eliminar este problema foi necessário implementar uma função capaz de efetuar um corte na área da imagem. Portanto, as imagens corrigidas e recortas passam a ter a dimensão de 944(V) x 1200(H) *pixels*.

2.3. Mapeamento da porcentagem de cobertura de plantas daninhas

De posse dos valores de percentuais da cobertura das plantas daninhas e seus respectivos valores de coordenadas, foram construídos oito mapas com classes destes percentuais, utilizando técnicas de geoestatística por meio do *software* GS+, versão 9.0. Sendo um mapa para cada tipo de câmera utilizada (Marlin e Cyber-shot), em cada altura testada (3 e 4 m), nos dois períodos de captura (37 e 46 DAP). A aplicação das técnicas de geoestatística dos dados georreferenciados seguiu as seguintes etapas: estatística descritiva e exploratória, semivariograma, validação cruzada e krigagem.

A análise descritiva e exploratória dos dados precede a análise geoestatística, sendo importante para o desenvolvimento da modelagem espacial. Esta análise é muito sensível à presença de valores discrepantes (outliers e extremos) e à ausência de estacionariedade. O programa computacional utilizado na análise exploratória e descritiva foi o STATISTICA 7.

Por meio dos gráficos de caixa (“box-plots”) foram determinados os valores discrepantes. Estes valores foram analisados para verificar se ocorreram erros de amostragem e, ou, processamento das imagens ou se

realmente estes valores retratavam o fenômeno presente na área. Foram analisadas as medidas de dispersão, assimetria e curtose dos dados, e por fim o teste de normalidade de Shapiro Wilk's (W). Valores de "p value" maiores que o nível de significância de 5% ($p > 0,05$) indicavam distribuição normal dos dados, do contrário os valores indicavam distribuição não normal dos dados.

Após a etapa da estatística descritiva, iniciou-se o cálculo da semivariância para todos os pares de pontos possíveis, para os resultados do percentual da cobertura de plantas daninhas, de acordo com a equação 1.

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

em que $\gamma^*(h)$ é semivariância estimada para distância h ; $\gamma^*(h)$, semivariância estimada para distância h ; $N(h)$, número de pares de valores que satisfazem a distância h ; h , vetor que separa a posição das medições; $Z(x_i)$, valor da variável na posição x ; e $Z(x_i + h)$, valor da variável na posição $x+h$.

Com as semivariâncias calculadas foi possível o ajuste de um modelo matemático teórico aos dados, constituindo o semivariograma, sendo que os modelos testados foram o gaussiano, o esférico e o exponencial. Por meio das análises do semivariograma e seus parâmetros (efeito pepita, alcance da dependência espacial e patamar), verificou-se a existência de dependência espacial do atributo porcentagem de cobertura de plantas daninhas na área em estudo e a distância a partir da qual as amostras passam a ser independentes.

O critério para escolha do melhor modelo baseou-se nos parâmetros obtidos pelo método de validação cruzada: coeficiente de correlação e o erro padrão. Portanto, o modelo escolhido foi o que obteve coeficiente de correlação mais próximo de 1 e erro padrão mais próximo de 0.

O grau de dependência espacial foi obtido por meio do índice de dependência espacial (IDE) utilizando a relação $[(C/(Co+C))*100]$ e classificado segundo Zimback (2001). Para o intervalo $IDE < 25\%$, a dependência espacial é considerada como fraca, de $25\% \leq IDE < 75\%$ moderada e para $IDE \geq 75\%$ forte.

Após a análise da estrutura espacial das amostras das características avaliadas, e selecionados os modelos de semivariograma, iniciou-se a etapa da krigagem ordinária e elaboração dos mapas. A técnica de interpolação krigagem foi utilizada para atribuir valores aos pontos não amostrados na área e possibilitar a geração dos mapas de variabilidade do atributo em questão. A krigagem fornece estimativas não tendenciosas e com a minimização do erro das variâncias para os pontos não amostrados.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Estatística descritiva

As Figuras 6 a 9 apresentam os gráficos de caixa obtidos pelas duas câmeras utilizadas (Marlin e Cyber-shot), nas duas alturas de posicionamento das câmeras testadas (3 e 4 m) aos 37 e 46 DAP.

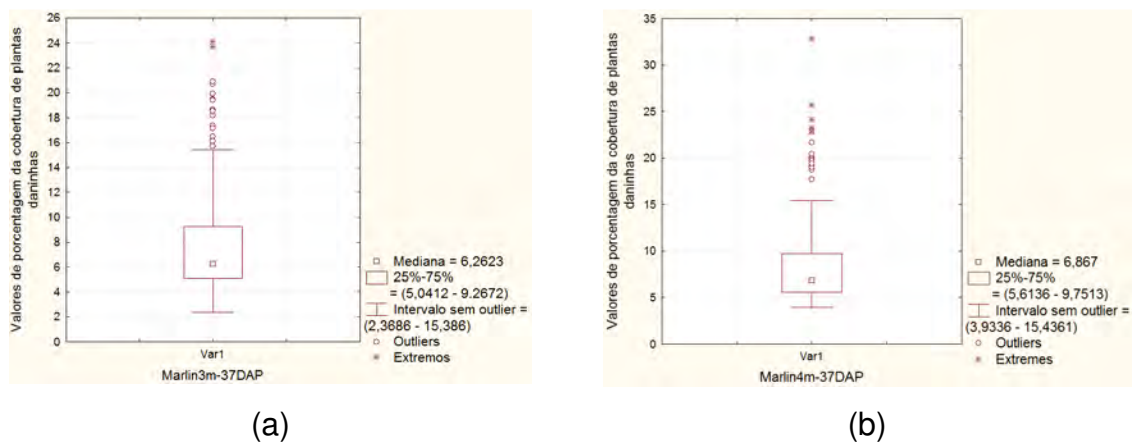
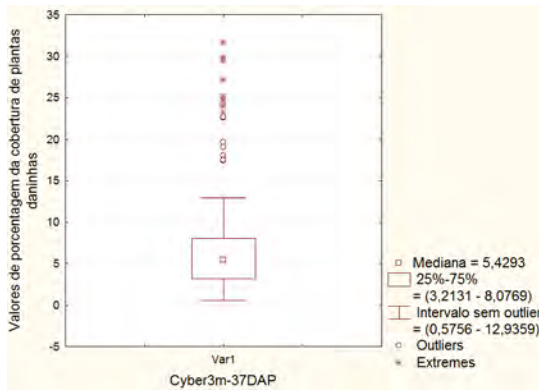
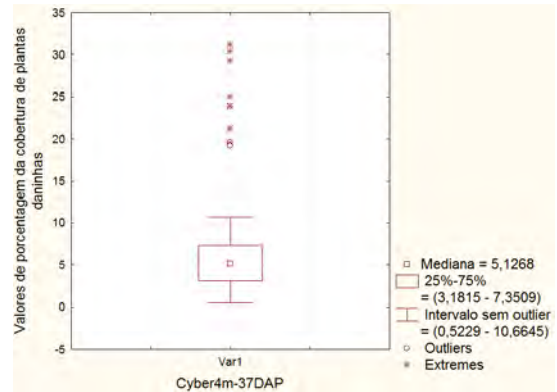


Figura 6 – Gráfico de caixa da distribuição dos valores de porcentagem da cobertura de plantas daninhas obtidos pela câmera Marlin a 3 m (a) e a 4 m (b) de altura e aos 37 DAP.



(a)



(b)

Figura 7 – Gráfico de caixa da distribuição dos valores de porcentagem da cobertura de plantas daninhas obtidos pela câmera Cyber-shot a 3 m (a) e a 4 m (b) de altura e aos 37 DAP.

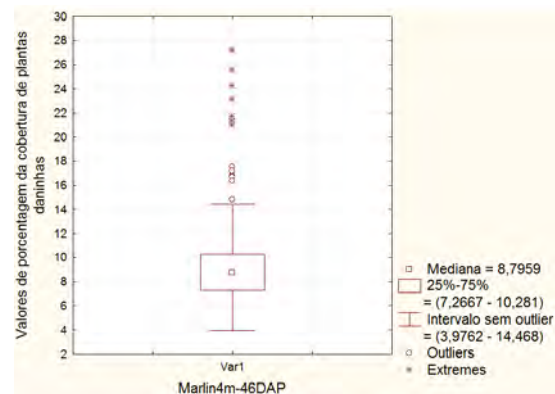
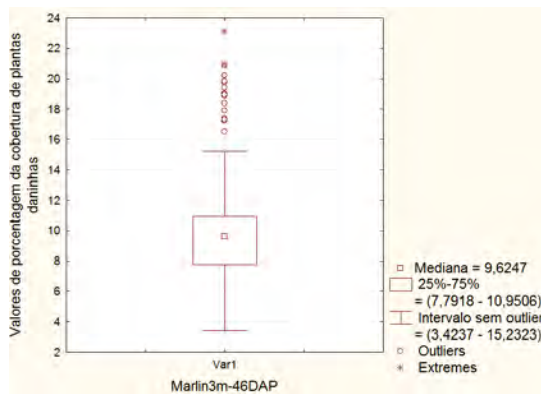


Figura 8 – Gráfico de caixa da distribuição dos valores de porcentagem da cobertura de plantas daninhas obtidos pela câmera Marlin a 3 m (a) e a 4 m (b) de altura e aos 46 DAP.

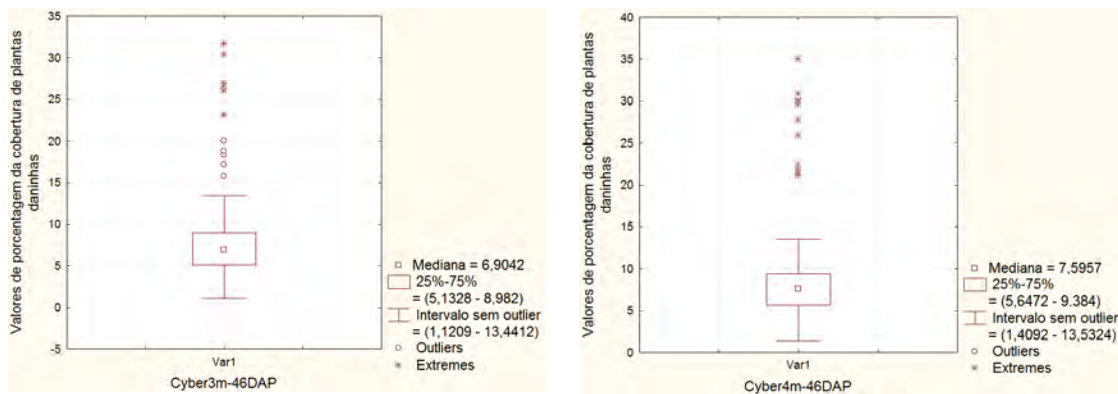


Figura 9 – Gráfico de caixa da distribuição dos valores de porcentagem da cobertura de plantas daninhas obtidos pela câmera Cyber-shot a 3 m (a) e a 4 m (b) de altura e aos 46 DAP.

Todos os valores discrepantes foram analisados para verificar se houve erro no processamento ou captura das imagens e no cálculo da porcentagem da cobertura de plantas daninhas nas referentes imagens. Constatou-se que apenas alguns dos valores discrepantes obtidos pela câmera Cyber-shot a 3 m de altura e aos 37 DAP não ocorreram devido a erros no processamento, pois representaram áreas infestadas com plantas daninhas e, portanto puderam condizer com seus valores calculados. Logo, estes pontos não foram retirados das análises estatísticas e geoestatísticas. Os demais valores discrepantes foram ocasionados devido a erros no processo de limiarização e foram retirados das análises estatísticas e geoestatísticas. Estes erros ocorreram devido a uma desuniformidade observada na área onde se realizou a captura das imagens. Nesta área havia uma região onde as plantas de girassol não se desenvolveram e ficaram com tamanho bem inferior as demais. Ao iniciar o processo de limiarização, das imagens que retratavam essa região, observou-se pelo histograma a presença somente de uma classe, pois a classe referente às plantas foi representada por poucos *pixels*, o que não promoveu destaque desta classe no histograma. Isto fez com que o cálculo do limiar automático contivesse erro, e, portanto ao limiarizar estas imagens, estas se apresentavam com altos valores de cobertura de plantas. Este tipo de erro pode ser visualizado pelas imagens e histograma apresentado na Figura 10.

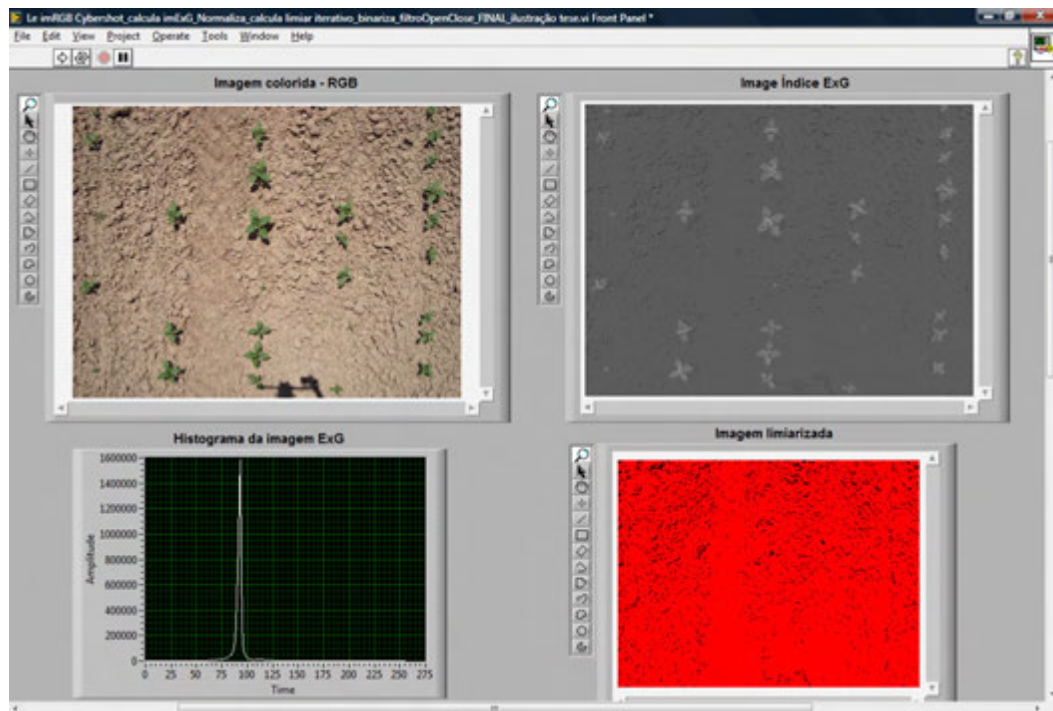


Figura 10 – Ilustração do problema ocorrido no processo de limiarização das imagens ExG ,devido a um erro no cálculo do limiar automático, causado pela pouca representação da classe referente às plantas.

A Tabela 1 apresenta o número total de valores de porcentagem da cobertura de plantas daninhas, e os valores discrepantes para as duas câmeras utilizadas, nas duas alturas e estádios de crescimento da cultura testados.

Sendo assim, foram retirados aos 37 DAP, 17 valores discrepantes obtidos pela câmera Marlin a 3 m de altura, 30 para a câmera Marlin a 4 m de altura, 19 para a câmera Cyber-shot a 3 m de altura e 10 para esta mesma câmera, porém a 4 m de altura. Já para aos 46 DAP foram retirados 17, 13, 12 e 11 valores discrepantes, respectivamente, obtidos pela câmera Marlin a 3 e 4 m de altura e pela câmera Cyber-shot a 3 e 4 m.

Tabela 1 – Número total dos valores de porcentagem da cobertura de plantas daninhas e os respectivos valores discrepantes para as câmeras Marlin e Cyber-shot, a 3 e 4 m de altura, aos 37 e 46 DAP

	Número total dos valores de porcentagem da cobertura de plantas daninhas	Valores discrepantes
Marlin a 3 m aos 37 DAP	184	17
Marlin a 4 m aos 37 DAP	120	30
Cyber a 3 m aos 37 DAP	119	19
Cyber a 4 m aos 37 DAP	103	10
Marlin a 3 m aos 46 DAP	176	17
Marlin a 4 m aos 46 DAP	160	13
Cyber a 3 m aos 46 DAP	173	12
Cyber a 4 m aos 46 DAP	159	11

Marlin a 3 m: câmera Marlin na altura de 3 m; Marlin a 4 m: câmera Marlin na altura de 4 m; Cyber a 3 m: câmera Cyber-shot na altura de 3 m; Cyber a 4 m: câmera Cyber-shot na altura de 4 m; Valores discrepantes: outliers e extremos.

Os resultados obtidos pela análise da estatística descritiva para o percentual da cobertura das plantas daninhas nas entrelinhas obtido pelas duas câmeras, nas duas alturas testadas, aos 37 e 46 DAP, são apresentados, respectivamente, nas Tabelas 2 e 3.

Tabela 2 – Estatística descritiva e distribuição de freqüência dos valores de porcentagem da cobertura de plantas daninhas utilizando as câmeras Marlin e Cyber-shot, a 3 e 4 m de altura, aos 37 DAP

	Média	Mediana	Mínimo	Máximo	CV%	s	Cs	Ck	W
Marlin a 3 m	6,70	6,07	2,37	15,39	38,53	2,58	1,07	0,91	*
Marlin a 4 m	6,30	6,29	3,93	9,46	22,40	1,41	0,27	-0,50	ns
Cyber a 3 m	4,87	4,60	0,58	11,68	50,89	2,48	0,59	0,02	*
Cyber a 4 m	4,88	4,63	0,52	10,66	48,61	2,37	0,34	-0,64	ns

Marlin a 3 m: câmera Marlin na altura de 3 m; Marlin a 4 m: câmera Marlin na altura de 4 m; Cyber a 3 m: câmera Cyber-shot na altura de 3 m; Cyber a 4 m: câmera Cyber-shot na altura de 4 m; CV%: coeficiente de variação em porcentagem; s: desvio padrão; Cs: coeficiente de assimetria; Ck: coeficiente de curtose; W: teste de normalidade de Shapiro Wilk's; * distribuição não normal pelo teste de Shapiro Wilk's, a 5% de probabilidade; ns: distribuição normal pelo teste de Shapiro Wilk's, a 5% de probabilidade.

Tabela 3 – Estatística descritiva e distribuição de freqüência dos valores de porcentagem da cobertura de plantas daninhas utilizando as câmeras Marlin e Cyber-shot, a 3 e 4 m de altura, aos 46 DAP

	Média	Mediana	Mínimo	Máximo	CV%	s	Cs	Ck	W
Marlin a 3 m	9,05	9,19	3,42	15,23	26,04	2,36	0,17	-0,04	ns
Marlin a 4 m	8,55	8,63	3,98	14,47	23,93	2,05	0,25	0,35	ns
Cyber a 3 m	6,68	6,50	1,12	13,44	38,41	2,57	0,11	-0,11	ns
Cyber a 4 m	7,18	7,42	1,41	13,53	35,14	2,52	-0,28	-0,42	ns

Marlin a 3 m: câmera Marlin na altura de 3 m; Marlin a 4 m: câmera Marlin na altura de 4 m; Cyber a 3 m: câmera Cyber-shot na altura de 3 m; Cyber a 4 m: câmera Cyber-shot na altura de 4 m; CV%: coeficiente de variação em porcentagem; s: desvio padrão; Cs: coeficiente de assimetria; Ck: coeficiente de curtose; W: teste de normalidade de Shapiro Wilk's; * distribuição não normal pelo teste de Shapiro Wilk's, a 5% de probabilidade; ns: distribuição normal pelo teste de Shapiro Wilk's, a 5% de probabilidade.

Somente os valores obtidos pelas câmeras Marlin e Cyber-shot a 3 m de altura aos 37 DAP não obtiveram distribuição normal, para o teste de normalidade de Shapiro Wilk (W), ao nível de 5% de significância. Entretanto, de acordo com Cressie (1993), a normalidade dos dados não é uma exigência da geoestatística, é conveniente apenas que a distribuição não apresente caudas muito alongadas, o que poderia comprometer as análises.

Os valores do coeficiente de curtose (Ck), que se refere ao grau de achatamento da distribuição de freqüência dos dados, apresentaram tendência ao valor zero, com exceção dos valores obtidos pela câmera Marlin a 3 m de altura e pela câmera Cyber-shot a 4 m de altura aos 37 DAP, que tiveram os valores de curtose mais próximos de 1. Isto indica que as curvas de distribuição, para a maioria dos tratamentos, tenderam a ser mesocúrtica (nem achatada nem alongada). O valor de Ck obtido pela câmera Marlin, a 3 m de altura e aos 37 DAP, foi o mais próximo de 1, indicando uma tendência a um alongamento da curva de distribuição (distribuição leptocúrtica).

Observou-se, que no geral, os valores das medidas de tendência central (média e mediana) foram próximos, o que indicou tendência dos dados a uma distribuição simétrica. Esta tendência de simetria também pode ser observada pelo coeficiente de assimetria (Cs), cujos valores foram próximos de zero, com exceção do valor obtido pela câmera Marlin, a 3 m aos 37 DAP, para

a qual o valor de C_s foi maior que 1, contribuindo para a não distribuição normal deste tratamento.

Os coeficientes de variação (CV%) variaram de 22,40 a 50,89%. De acordo com a classificação proposta por Warrick e Nielsen (1980), os valores de CV menores que 12% indicam baixa variação dos dados, para valores de CV entre 12 e 60% os dados são classificados como de média variação e acima de 60% os valores de CV são considerados como de alta variação. Portanto, os valores de CV no presente estudo estão contidos dentro da faixa considerada como de média variação.

Os valores médios de porcentagem da cobertura de plantas daninhas calculados nas imagens Marlin foram superiores aos das imagens Cyber, independente da altura das câmeras e do estágio de crescimento da cultura. Este fato se deve à maior presença de ruídos nas imagens Marlin, observados durante o processamento. Estes ruídos geraram uma superestimação dos *pixels* referentes às plantas daninhas.

As imagens Cyber além de possuir maior resolução espacial que as da câmera Marlin, possuíam ajuste de alguns parâmetros automáticos, principalmente os relacionados com o foco e luminosidade. Isto proporcionou imagens com maior detalhamento entre solo e plantas, e amenizou os problemas com sombras sob os alvos. A Figura 11 apresenta uma comparação entre as imagens coloridas e suas respectivas imagens limiarizadas e filtradas geradas pelas câmeras Marlin e Cyber-shot, na mesma altura e mesmo estágio de crescimento.

Na Figura 11a, a região coberta pela sombra da pá do trator na imagem colorida obstruiu a retratação do alvo pela câmera Marlin, gerando descontinuidades nas linhas de cultura. Já a Figura 11b exemplifica que a região coberta pela sombra da pá do trator ficou mais visível na imagem colorida da câmera Cyber-shot, justamente devido a correções automáticas que ocorrem na confecção destas imagens, não afetando nas imagens limiarizadas.

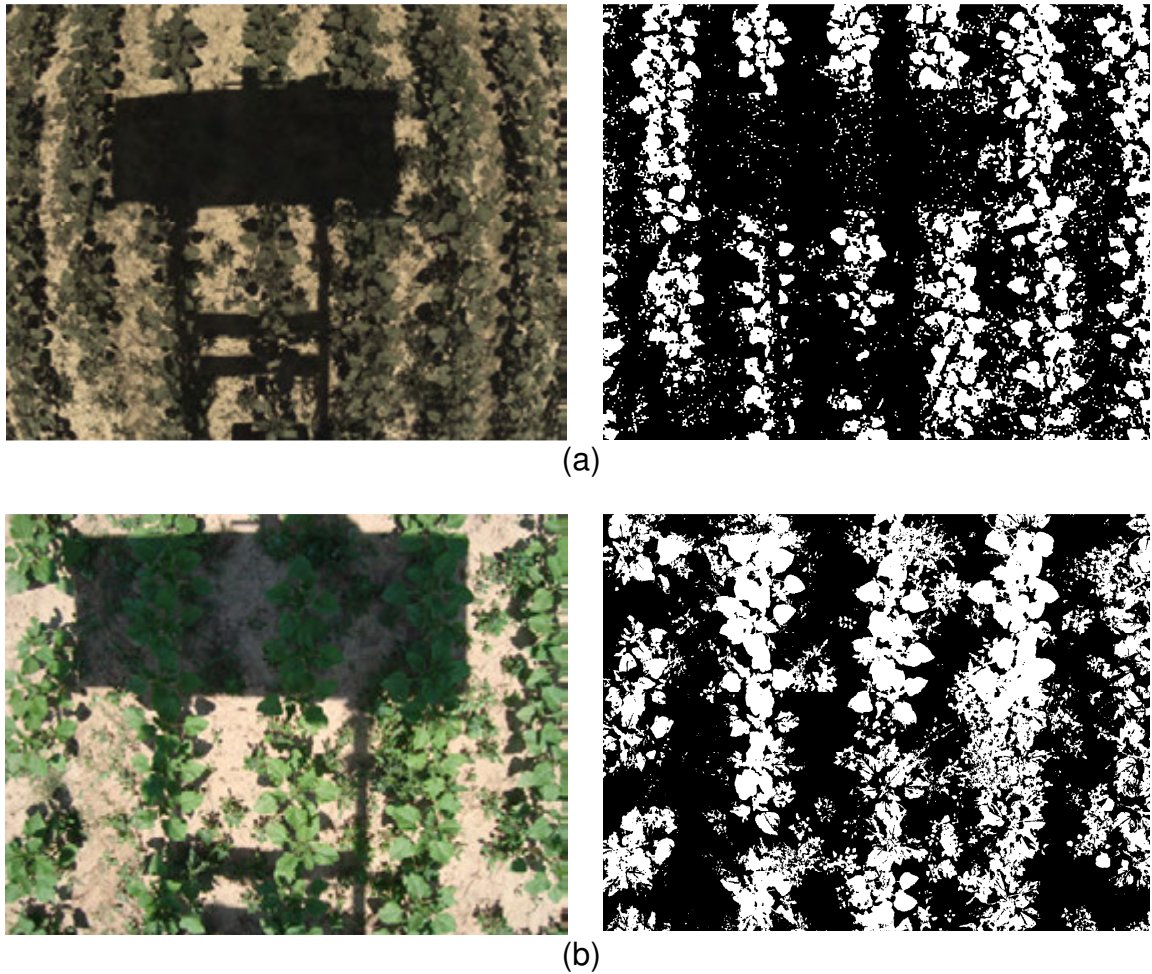


Figura 11 – Imagens coloridas e suas respectivas imagens limiarizadas e filtradas, capturadas aos 3 m de altura e aos 37 DAP, pelas câmeras Marlin (a) e Cyber-shot (b).

É possível observar também que apesar das duas câmeras estarem posicionadas na mesma altura a câmera Marlin retratou uma maior área do que a câmera Cyber-shot. Isto se deve a diferentes distâncias focais, o que proporcionou maior resolução espacial à câmera Cyber-shot e que contribuiu para um maior detalhamento entre plantas e solo.

A câmera Cyber-shot foi utilizada neste trabalho não só devido à sua alta resolução espacial, mas também pela facilidade de ser encontrada no mercado, por possuir preços mais baratos e pela facilidade de operação. Entretanto, esta câmera possui ajustes internos automáticos que fogem ao controle do operador, impedindo a fixação de certos parâmetros. No presente

estudo, observou-se que as imagens da câmera Cyber-shot foram mais eficientes na segmentação entre plantas e solo e apresentaram menores formações de ruídos. Em consequência disso, com a utilização desta câmera, pode-se ter a diminuição do custo do SVA e a retratação mais próxima do real. Em contrapartida, uma desvantagem dessa câmera é não possuir um disparador automático, sendo necessário construir e adaptar na câmera, por exemplo, um disparador eletrônico, para viabilizar seu uso no campo e diminuir problemas na captura pelo disparo manual.

Houve um aumento nos valores médios de porcentagem da cobertura de plantas daninhas dos 37 DAP para os 46 DAP. Este aumento já era esperado visto que não foi realizado nenhum método de controle de plantas daninhas na área nem antes e nem durante o período de aquisição dos dados.

Com base nesta análise exploratória preliminar, assumiu-se que as distribuições podem ser consideradas suficientemente simétricas e com caudas não alongadas. Assumiu-se a ocorrência da estacionaridade necessária ao uso da geoestatística, em que a média e a variabilidade dos dados sejam constantes na área em estudo, tornando possível a construção de semivariogramas, com base nestas hipóteses.

3.2. Análise geoestatística e construção dos mapas

Nas Tabelas 4 e 5 são apresentados os modelos e parâmetros dos semivariogramas que melhor se ajustaram, e os parâmetros da validação cruzada obtidos pelas duas câmeras utilizadas, nas duas alturas testadas, aos 37 e 46 DAP, respectivamente.

Tabela 4 – Modelos e parâmetros dos semivariogramas ajustados e parâmetros da validação cruzada obtidos pelas câmeras Marlin e Cyber-shot, a 3 e 4 m de altura e aos 37 DAP

	Modelos e parâmetros dos semivariogramas										Parâmetros da validação cruzada		
	Modelo	RBV (m)	NV	n	Efeito pepita (Co)	Patamar (Co+C)	a	R ²	IDE	RSS	Coefficiente de regressão (CR)	R ²	SE
Marlin a 3 m	Esférico	150,55	16	167	3,00	7,18	58,10	0,97	0,58	0,54	1,03	0,35	0,11
Marlin a 4 m	Esférico	148,80	16	90	0,22	1,98	13,60	0,89	0,89	0,05	0,72	0,12	0,21
Cyber a 3 m	Exponencial	150,55	16	100	1,34	6,55	49,20	0,84	0,80	2,90	1,16	0,14	0,40
Cyber a 4 m	Exponencial	148,80	16	93	1,19	5,85	50,70	0,94	0,80	0,61	1,06	0,33	0,16

Marlin a 3 m: câmera Marlin na altura de 3 m; Marlin a 4 m: câmera Marlin na altura de 4 m; Cyber a 3 m: câmera Cyber-shot na altura de 3 m; Cyber a 4 m: câmera Cyber-shot na altura de 4 m; RBV: raio de busca da vizinhança em metros utilizado no cálculo da krigagem ordinária, NV: número máximo de pontos vizinhos utilizados no cálculo da krigagem ordinária, n: número total de pontos que foram utilizados na análise geoestatística, a: alcance; IDE: índice de dependência espacial, RSS: soma dos quadrados dos resíduos, SE: erro padrão.

Tabela 5 – Modelos e parâmetros dos semivariogramas ajustados e parâmetros da validação cruzada obtidos pelas câmeras Marlin e Cyber-shot, a 3 e 4 m de altura e aos 46 DAP

Modelos e parâmetros dos semivariogramas											Parâmetros da validação cruzada		
Modelo	RBV	NV	n	Efeito pepita (Co)	Patamar (Co+C)	a	R ²	IDE	RSS		Coeficiente de regressão (CR)	R ²	SE
Marlin a 3 m	Exponencial	152,76	16	159	0,40	5,42	15,90	0,88	0,93	0,34	1,15	0,09	0,30
Marlin a 4 m	Exponencial	149,22	16	147	0,38	4,17	20,40	0,94	0,91	0,13	1,02	0,12	0,23
Cyber a 3 m	Esférico	152,76	16	161	3,49	6,98	42,80	0,96	0,50	0,47	0,99	0,28	0,13
Cyber a 4 m	Esférico	149,22	16	148	2,55	6,28	35,60	0,97	0,59	0,30	0,97	0,11	0,36

Marlin a 3 m: câmera Marlin na altura de 3 m; Marlin a 4 m: câmera Marlin na altura de 4 m; Cyber a 3 m: câmera Cyber-shot na altura de 3 m; Cyber a 4 m: câmera Cyber-shot na altura de 4 m; RBV: raio de busca da vizinhança em metros utilizado no cálculo da krigagem ordinária, NV: número máximo de pontos vizinhos utilizados no cálculo da krigagem ordinária, n: número total de pontos que foram utilizados na análise geoestatística, a: alcance; IDE: índice de dependência espacial, RSS: soma dos quadrados dos resíduos, SE: erro padrão.

Os valores obtidos pela câmera Marlin aos 37 DAP e pela câmera Cyber-shot aos 46 DAP, nas duas alturas testadas, ajustaram modelo esférico, indicando que para intervalos pequenos de distância estes dados tiveram tendência linear. Já os valores obtidos pela à câmera Cyber-shot aos 37 DAP e pela câmera Marlin aos 46 DAP, nas duas alturas testadas, ajustaram modelo exponencial, o que indica que estes modelos apresentaram um aumento menos suave nos valores da semivariância para pequenos valores de h , proporcionando uma menor continuidade entre os dados em pares de pontos próximos entre si.

As Figuras 12 a 15 apresentam os modelos de semivariogramas ajustados pelas câmeras Marlin e Cyber-shot, a 3 e 4 m de altura e aos 37 e 46 DAP.

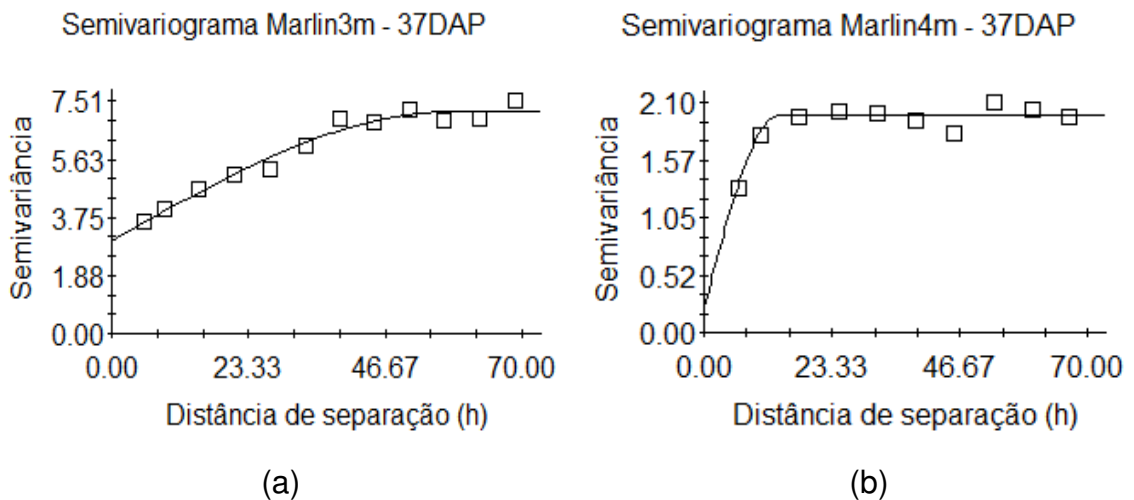


Figura 12 – Semivariograma ajustado aos valores obtidos pela câmera Marlin a 3 m (a) e a 4 m (b) de altura e aos 37 DAP, para a distância de separação (h) em metros.

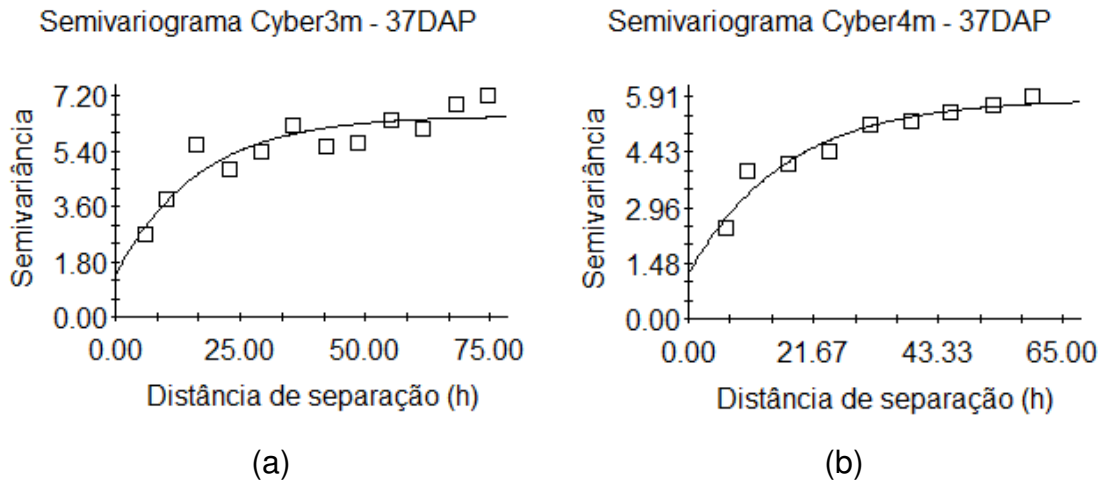


Figura 13 – Semivariograma ajustado aos valores obtidos pela câmera Cyber-shot a 3 m (a) e a 4 m (b) de altura e aos 37 DAP, para a distância de separação (h) em metros.

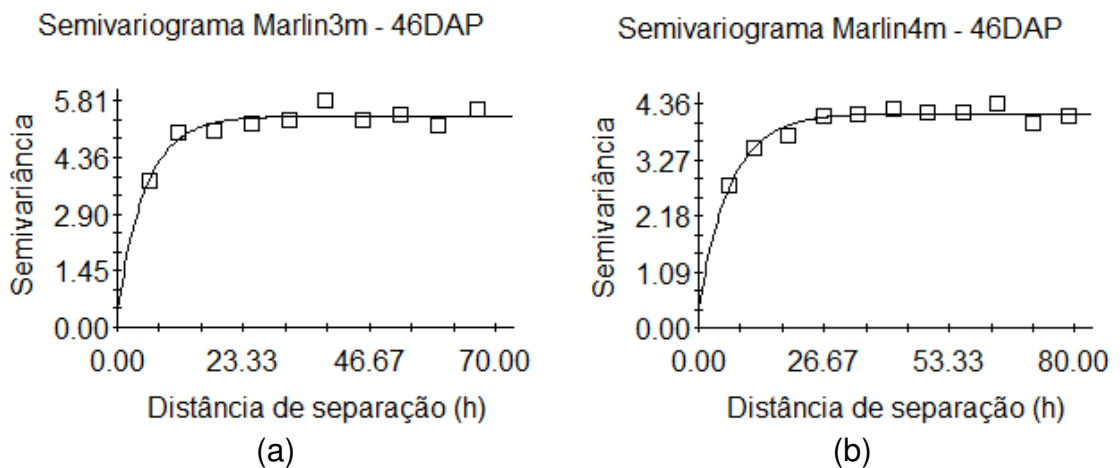


Figura 14 – Semivariograma ajustado aos valores obtidos pela câmera Marlin a 3 m (a) e a 4 m (b) de altura e aos 46 DAP, para a distância de separação (h) em metros.

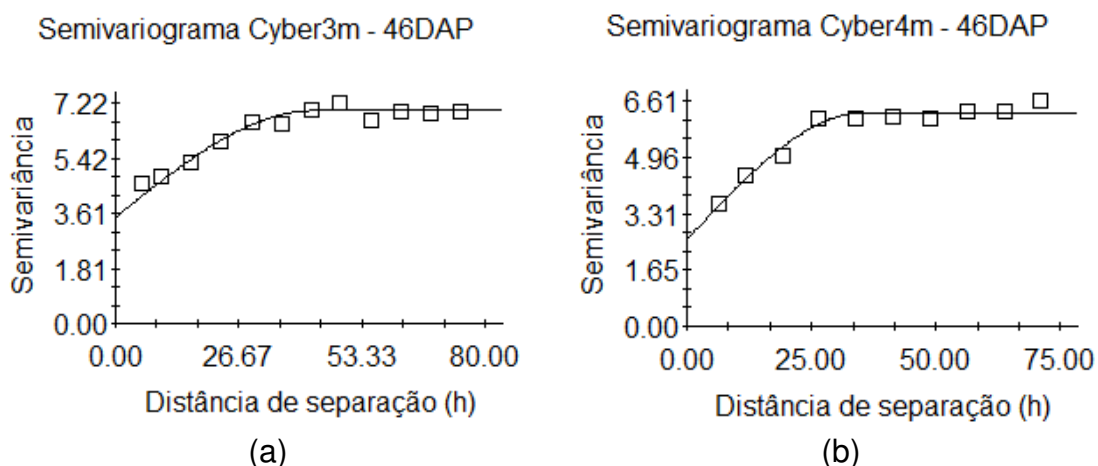


Figura 15 – Semivariograma ajustado aos valores obtidos pela câmera Cyber-shot a 3 m (a) e a 4 m (b) de altura e aos 46 DAP, para a distância de separação (h) em metros.

Os alcances foram de 58,10; 13,60; 49,20 e 50,70 m, respectivamente, para a câmera Marlin a 3 e 4 m de altura e para a câmera Cyber-shot a 3 e 4 m de altura aos 37 DAP e 15,90; 20,40; 42,80 e 35,60 para a câmera Marlin a 3 e 4 m de altura e para a câmera Cyber-shot a 3 e 4 m de altura aos 46 DAP. Os alcances não extrapolaram a distância máxima entre os pontos amostrados e nem foram inferiores a menor distância amostral, validando assim a grade amostral.

Segundo Silva (2009), os pontos localizados em uma área de raio menor ou igual ao alcance são mais similares e são dependentes espacialmente entre si e podem ser utilizados para estimar valores para locais não amostrados. Os valores de alcance também podem estar relacionados com a qualidade das estimativas, pois ele determina o número de valores a serem usados no processo de interpolação.

Com relação ao efeito pepita (C_0), quanto menor este valor e mais próximo de zero mais precisão terá as estimativas, pois C_0 representa os erros de amostragem e erros de cálculo da variável, que causam essa descontinuidade na origem. De acordo com Vieira (2000), C_0 representa o componente da variabilidade espacial que não pode ser relacionado com uma causa específica, sendo esta variabilidade devido ao acaso e quanto menor a

variação ao acaso mais precisa é a estimativa. Os valores de C_o obtidos pela câmera Marlin a 4 m de altura em ambos os estádios de crescimento da cultura estudados, foram os menores e mais próximos de zero.

Aos 37 DAP o valor do índice de dependência espacial (IDE) obtido pela câmera Marlin a 3 m de altura foi de 0,58, sendo este o menor valor e o único a promover moderada dependência espacial, neste estádio de crescimento da cultura. Os demais valores de IDE aos 37 DAP foram maiores e iguais que 0,80 indicando forte dependência espacial. Já aos 46 DAP, os modelos referentes à câmera Marlin a 3 e 4 m de altura apresentaram os valores de 0,93 e 0,91, respectivamente, indicando forte dependência espacial, e os modelos referentes à câmera Cyber-shot a 3 e 4 m de altura, apresentaram, respectivamente, os valores de 0,50 e 0,59, o que atribui moderada dependência espacial a estes modelos, segunda a classificação proposta por Zimback (2001). Neste estádio de crescimento da cultura (46 DAP) houve uma diferenciação no grau da dependência espacial pelo tipo de câmera. De acordo com Vieira (1997), quanto maior for a proporção da variância estrutural (C) para o patamar (C_o+C), maior será a semelhança entre os valores vizinhos e a continuidade do fenômeno e menor variância da estimativa. Com isso, aumenta-se a confiança nas estimativas de valores em locais não medidos pelo método de interpolação por krigagem ordinária.

As Figuras 16 a 19 apresentam os gráficos da validação cruzada, que possuem a dispersão da nuvem dos pontos dos valores amostrados versus os valores estimados. Apresenta também a reta de inclinação ideal onde os valores estimados são iguais aos amostrados e a reta tracejada que simboliza a reta de ajuste da nuvem dos pontos, para as duas câmeras utilizadas nas duas alturas testadas aos 37 e 46 DAP.

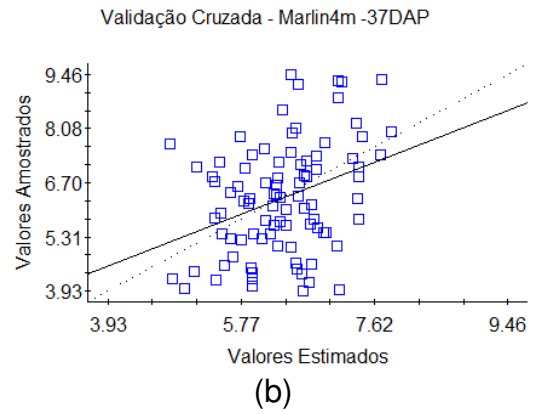
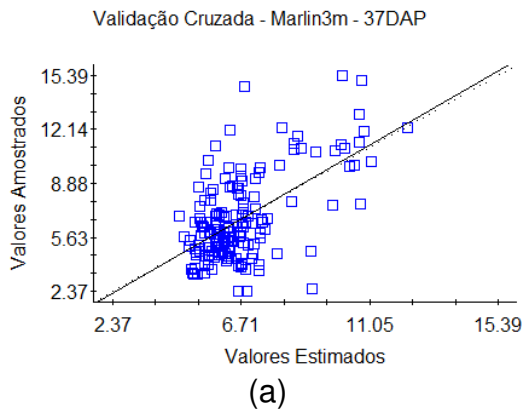


Figura 16 – Gráfico de validação cruzada obtido pela câmera Marlin a 3 m (a) e a 4 m (b) de altura e aos 37 DAP.

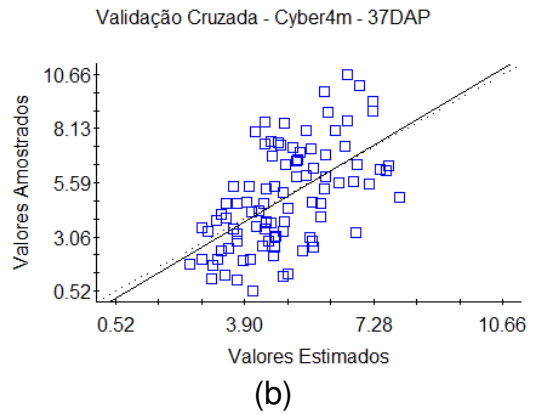
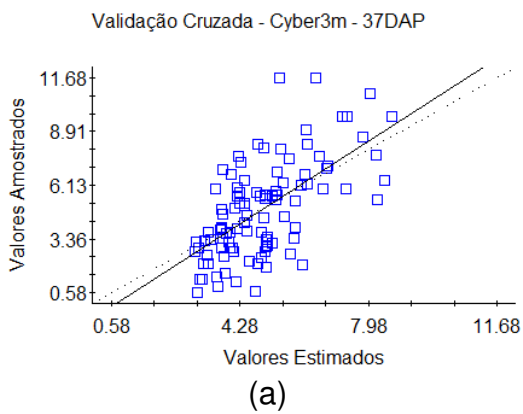


Figura 17 – Gráfico de validação cruzada obtido pela câmera Cyber-shot a 3 m (a) e a 4 m (b) de altura e aos 37 DAP.

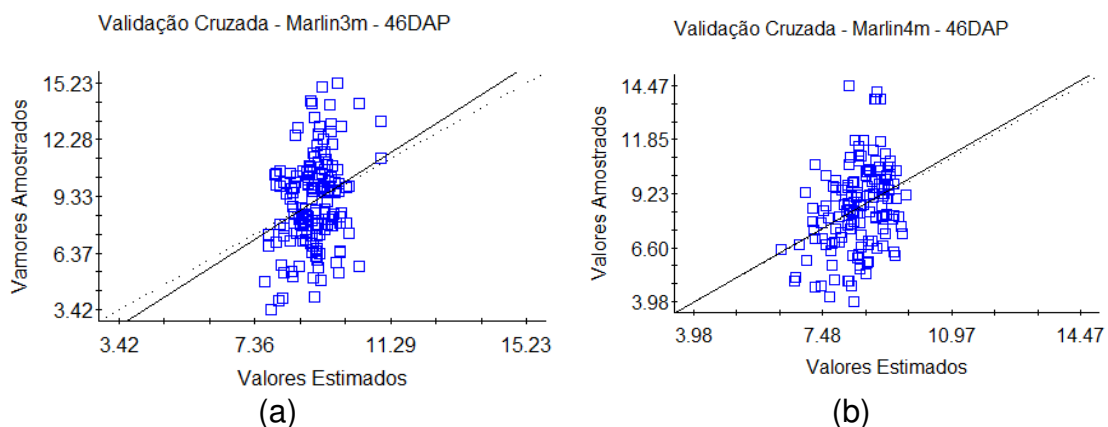


Figura 18 – Gráfico de validação cruzada obtido pela câmera Marlin a 3 m (a) e a 4 m (b) de altura e aos 46 DAP.

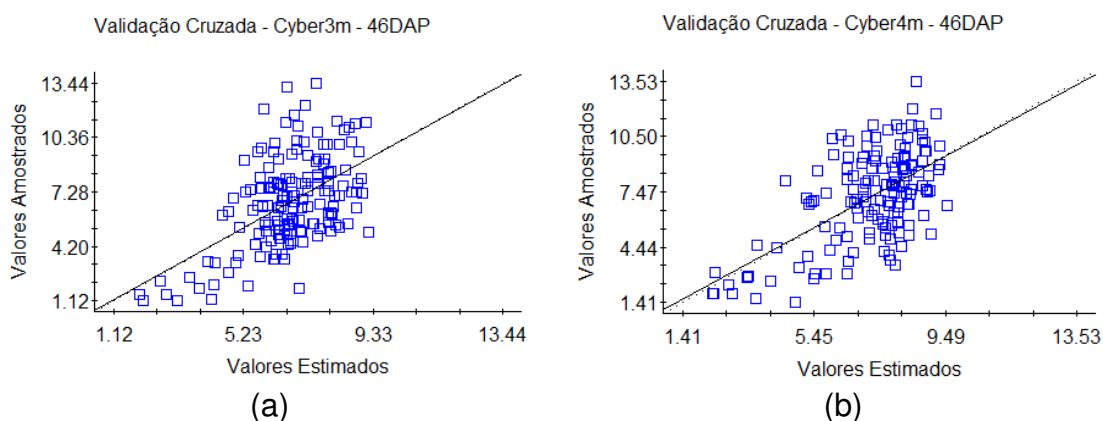


Figura 19 – Gráfico de validação cruzada obtido pela câmera Cyber-shot a 3 m (a) e a 4 m (b) de altura e aos 46 DAP.

Analisando os valores dos parâmetros da validação cruzada (Tabelas 3 e 4) é possível observar que, em geral, os valores de R^2 foram baixos, sendo 0,35 o maior valor e referente a câmera Marlin a 3 m de altura e aos 37DAP, que também, obteve o valor de coeficiente de regressão mais próximo de 1 e o menor valor de SE dentro deste mesmo estágio de crescimento da cultura. Observando as Figuras 16 e 17, que representam os gráficos da validação cruzada aos 37 DAP, verificou-se que o gráfico referente à câmera Marlin a 3 m de altura possuiu maior aglomeração dos pontos próximos à reta de inclinação

ideal. Estes fatores indicam que o modelo ajustado por esta câmera e altura aos 37 DAP, pode ter sido o mais preciso na estimação dos valores não amostrados. Neste mesmo DAP, a análise contrária pode ser atribuída aos valores obtidos pela câmera Marlin a 4 m de altura, cujos parâmetros da validação cruzada foram os piores e o gráfico apresentou maior dispersão da nuvem de pontos, podendo inferir que este tratamento promoveu menor precisão da estimação para os pontos não amostrados.

Aos 46 DAP, a câmera Cyber-shot a 3 m de altura foi a que apresentou os parâmetros da validação cruzada mais favoráveis a uma estimação mais precisa dos valores não amostrados, neste estágio de crescimento. Este fato pode ser observado também pela análise entre as Figuras 18 e 19, onde esta câmera nesta mesma altura apresentou maior proximidade dos pontos à reta de inclinação ideal. Neste mesmo DAP, a câmera Marlin a 3 m de altura apresentou os parâmetros da validação cruzada menos favoráveis a estimação dos valores não amostrados e maior dispersão da nuvem de pontos nos gráficos da validação cruzada.

Baseado nos modelos de semivariância e levando-se em consideração os parâmetros ajustados, os dados obtidos pelas duas câmeras, nas duas alturas testadas e nos dois estágios de crescimento da cultura (37 e 46 DAP) estudados foram interpolados por meio da krigagem ordinária para mapear a porcentagem da cobertura de plantas daninhas nas entrelinhas (Figuras 20 a 27). Todos estes mapas foram construídos com classes que variam de 5 em 5%.

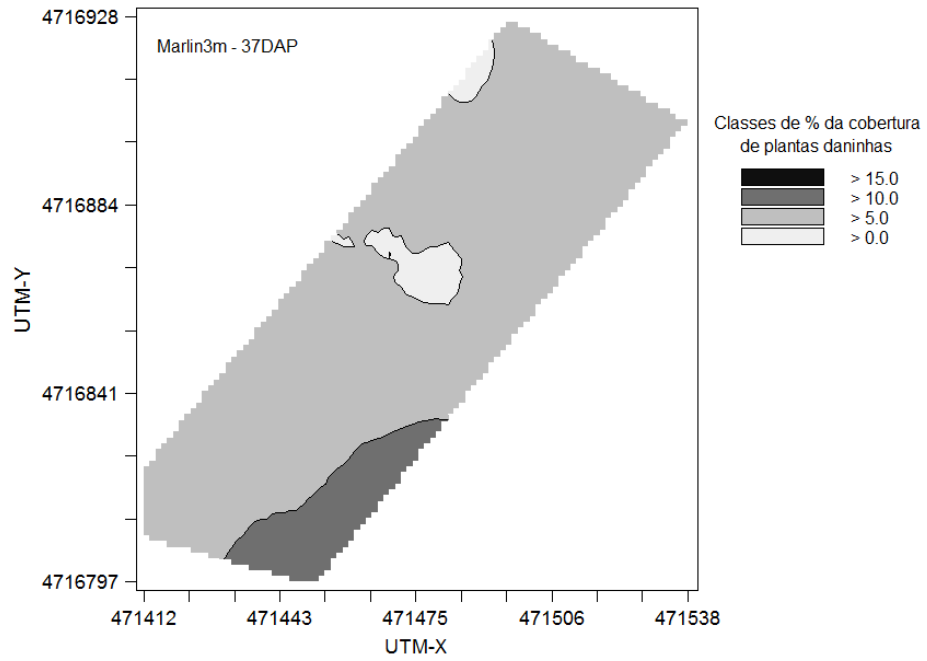


Figura 20 – Mapa de porcentagem da cobertura de plantas daninhas obtido pela câmera Marlin, posicionada a 3 m de altura, aos 37 DAP.

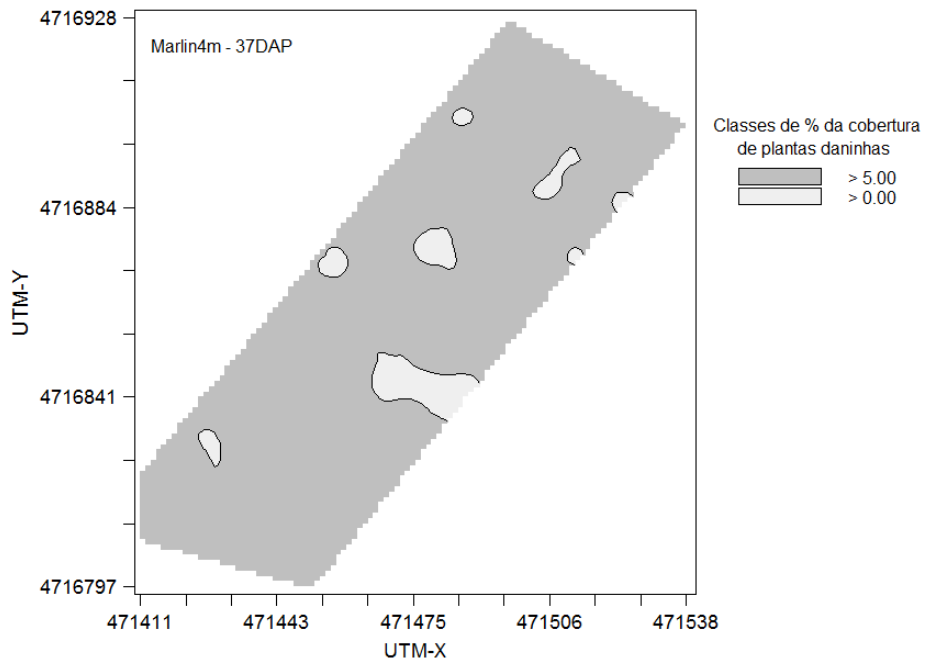


Figura 21 – Mapa de porcentagem da cobertura de plantas daninhas obtido pela câmera Marlin, posicionada a 4 m de altura, aos 37 DAP.

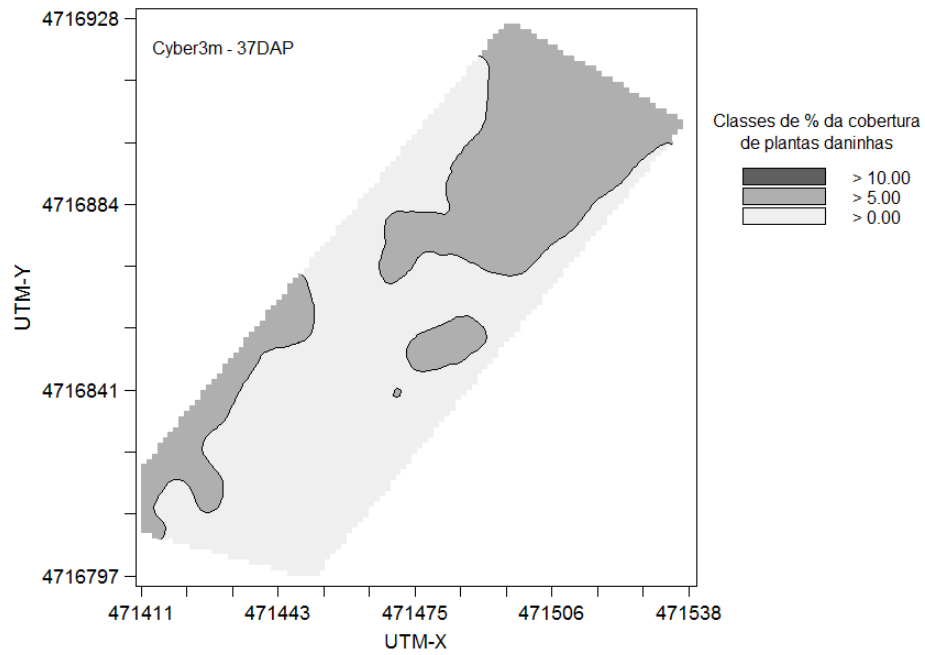


Figura 22 – Mapa de porcentagem da cobertura de plantas daninhas obtido pela câmera Cyber-shot, posicionada a 3 m de altura, aos 37 DAP.

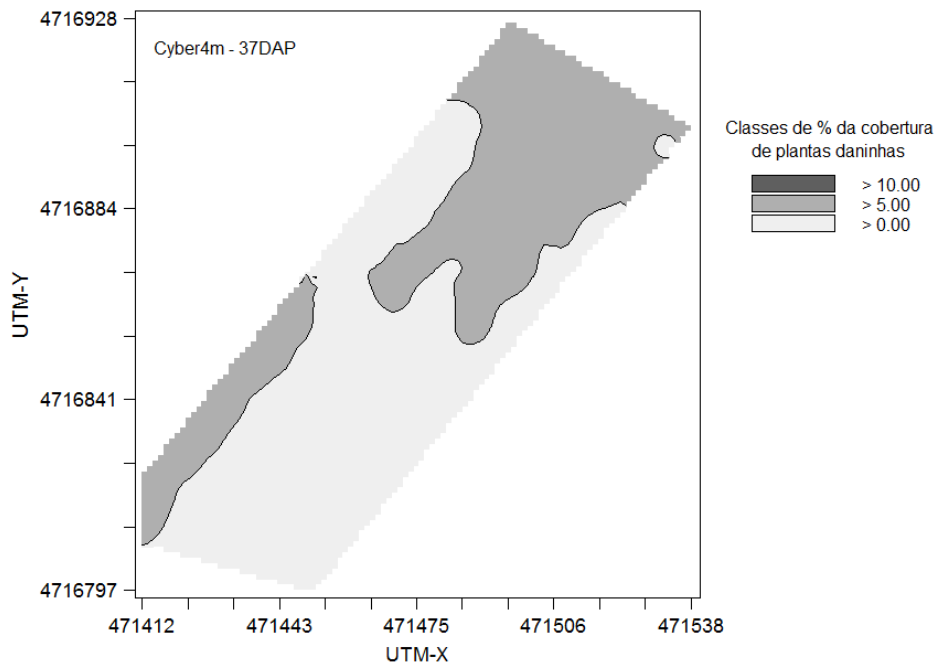


Figura 23 – Mapa de porcentagem da cobertura de plantas daninhas obtido pela câmera Cyber-shot, posicionada a 4 m de altura, aos 37 DAP.

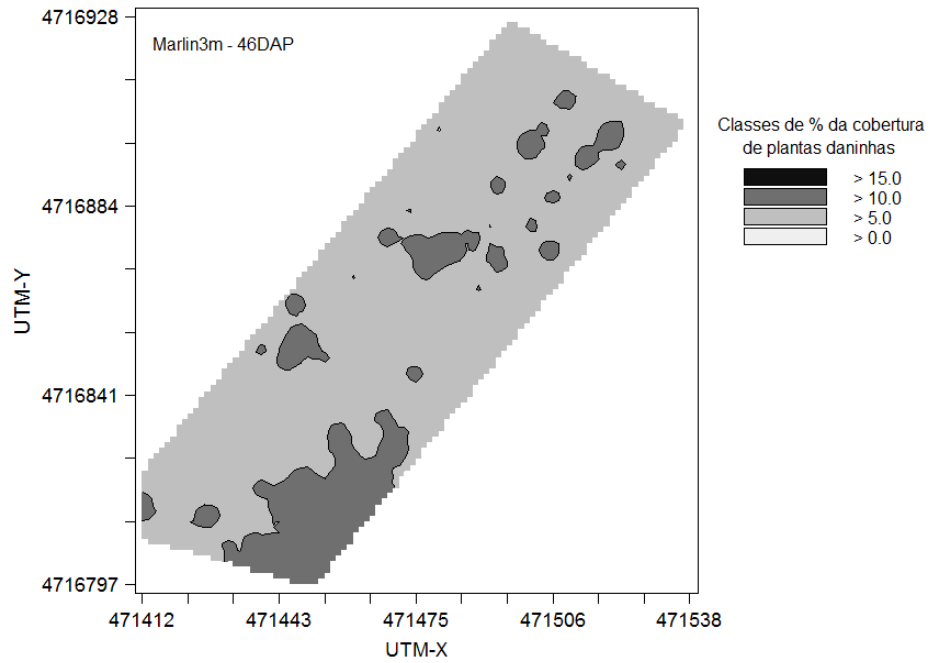


Figura 24 – Mapa de porcentagem da cobertura de plantas daninhas obtido pela câmera Marlin, posicionada a 3 m de altura, aos 46 DAP.

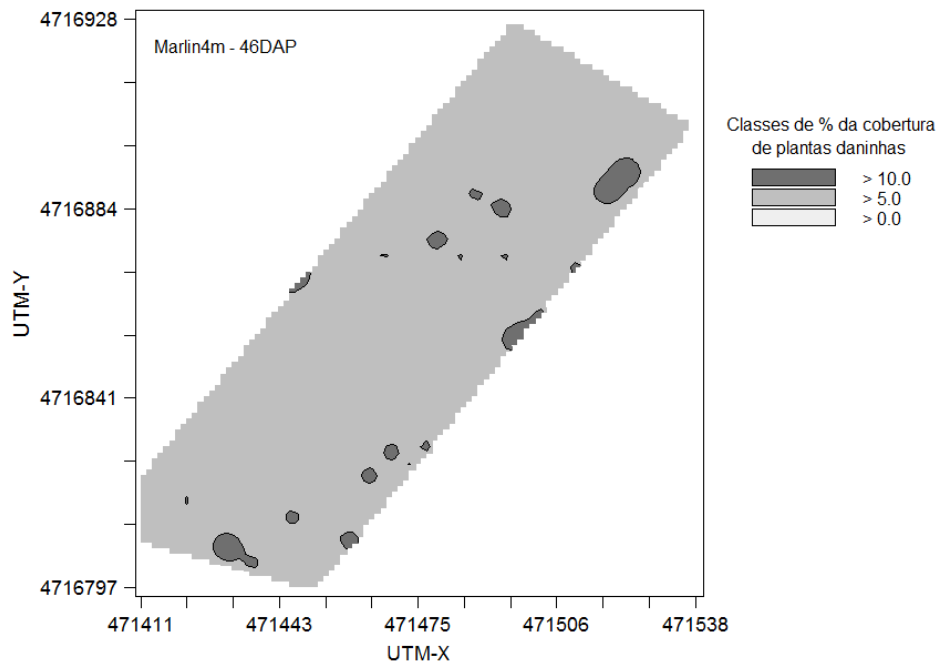


Figura 25 – Mapa de porcentagem da cobertura de plantas daninhas obtido pela câmera Marlin, posicionada a 4 m de altura, aos 46 DAP.

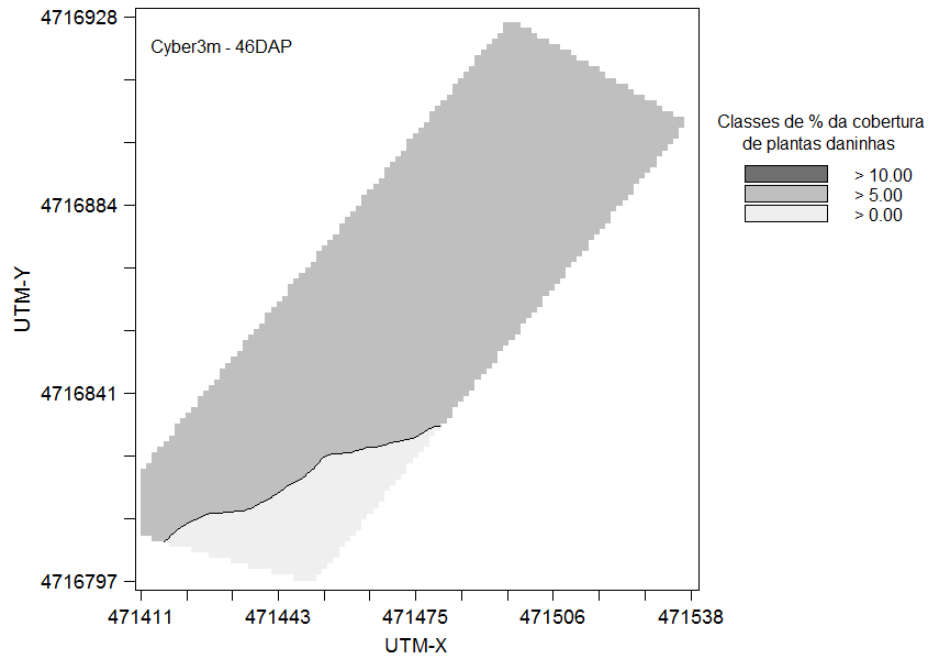


Figura 26 – Mapa de porcentagem da cobertura de plantas daninhas obtido pela câmera Cyber-shot, posicionada a 3 m de altura, aos 46 DAP.

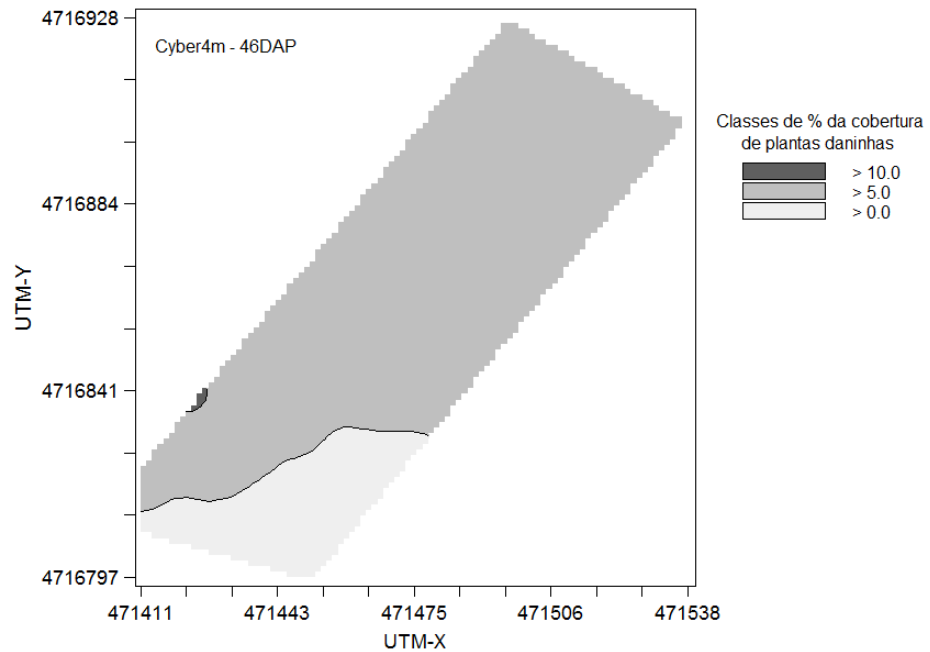


Figura 27 – Mapa de porcentagem da cobertura de plantas daninhas obtido pela câmera Cyber-shot, posicionada a 4 m de altura, aos 46 DAP.

Os mapas da câmera Cyber-shot, nas duas alturas testadas, em ambos os estádios de crescimento da cultura, foram semelhantes entre si, indicando que a altura não foi um fator de influência no mapeamento do percentual da cobertura das plantas daninhas por esta câmera. Porém, com relação aos mapas da câmera Marlin, observou-se menos similaridade entre os mapas obtidos para os dois estádios de crescimento. Inclusive, nos mapas desta câmera, a 3 m de altura, verificou-se a concentração dos maiores valores numa mesma região (canto inferior direito), o que não foi observado pelas imagens, nem por esta mesma câmera aos 4 m e nem pela outra câmera nas duas alturas e nos dois estádios de crescimento da cultura. Esta região onde se concentrou os maiores valores de porcentagem da cobertura de plantas daninhas nos mapas obtidos pela câmera Marlin a 3 m de altura, aos 37 e 46 DAP, foi a mesma região onde as plantas não se desenvolveram ocasionando os erros de processamento nas imagens descritos anteriormente e apresentados na Figura 10. Assim, provavelmente algumas imagens com amostras de áreas nesta região, apresentaram altos valores, porém estes valores não foram classificados como discrepantes e, portanto participaram da análise geoestatística e da construção dos mapas, promovendo o aparecimento desta região.

Aos 37 DAP houve predominância da classe de 5 a 10% nos mapas das câmeras Marlin e predominância da classe 0 a 5% nos mapas da câmera Cyber-shot. Esta diferença está relacionada com a maior presença de ruídos nas imagens limiarizadas da câmera Marlin, mesmo após as aplicações das operações morfológicas, o que promoveu o aumento do número de *pixels* referentes à cobertura das plantas daninhas nas entrelinhas. Já aos 46 DAP houve a predominância da classe de 5 a 10% em todos os mapas, o que indicou um aumento dos valores de porcentagem da cobertura de plantas daninhas nos mapas da câmera Cyber-shot. Entretanto, apesar dos mapas da câmera Marlin apresentar a mesma classe predominante (5 a 10%) observada aos 37 DAP, verificou-se um aumento das regiões da classe de 10 a 15%. Portanto, houve um aumento geral dos valores de porcentagem da cobertura das plantas daninhas dos 37 para os 46 DAP. Este fato já foi observado e comentado anteriormente na análise descritiva dos dados e ocorreu devido ao

fato de não ter sido aplicado nenhum tipo de controle de plantas daninhas desde o plantio até o período de captura dos dados.

4. CONCLUSÕES

Por meio de imagens digitais e técnicas de processamento de imagens e de geoestatística foi possível mapear o percentual da cobertura de plantas daninhas nas entrelinhas em uma área de cultivo de girassol.

As técnicas de geoestatística utilizadas possibilitaram o ajuste de modelos adequados aos dados e a construção de mapas de porcentagem da cobertura de plantas daninhas com as duas câmeras, alturas e estádios de crescimento da cultura testados.

As imagens da câmera Cyber-shot foram as mais indicadas para mapear a porcentagem da cobertura de plantas daninhas nas entrelinhas para ambos estádios de crescimento e alturas estudadas, pois apresentaram melhor contraste entre plantas e solo em relação às imagens da câmera Marlin.

As diferenças nas alturas de posicionamento das câmeras testadas não mostraram ser um fator de influência no mapeamento da porcentagem da cobertura de plantas daninhas.

5. REFERÊNCIAS

ANTUNIASSI, U.R. Agricultura de precisão: aplicação localizada de agrotóxicos. In: TECNOLOGIA E SEGURANÇA NA APLICAÇÃO DE AGROTÓXICOS, 1998, Santa Maria. **Anais...** Santa Maria: UFSM, 1998. p. 53-63.

BRIGHENTI, A.M.; MORAES, V.J.; OLIVEIRA JÚNIOR, R.S.; GAZZIERO, D.L.P.; VOLL, E.; GOMES, J.A. Persistência e fitotoxicidade do herbicida atrazine aplicado na cultura do milho sobre a cultura do girassol em sucessão. **Planta Daninha**, v. 20, n. 2, p. 291-297, 2002.

BRIGHENTI, A.M.; CASTRO, C.; OLIVEIRA JÚNIOR., R.S.; SCAPIM, C.A.; VOLL, E.; GAZZIERO, D.L.P. Períodos de interferência de plantas daninhas na cultura do girassol. **Planta Daninha**, v. 22, n. 2, p. 251-257, 2004.

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

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Disponível em: <http://www.cnpso.embrapa.br/index.php?op_page=54&cod_pai=38>. Acesso em: 27 mar. 2010.

LAMB, D.W.; BROWN, R.B. Remote sensing and mapping of weeds in crops. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 78, p. 117-125, 2001.

MENESES, P.R. Fundamentos da radiometria óptica espectral. In: MENESES, P.R.; MADEIRA NETTO, J.S. (Ed.). **Sensoriamento remoto: reflectância dos alvos naturais**. Brasília: UnB; Planaltina: Embrapa Cerrados, 2001. cap. 1, p. 15-39.

QUEIROZ, D.M.; DIAS, G.P.; MANTOVANI, E.C. Agricultura de precisão na produção de grãos. In: BORÉM, A.; GIUDICE, M.P.; QUEIROZ, D.M.; MANTOVANI, E.C.; FERREIRA, L.R.; VALLE, F.X.R.; GOMIDE, R.L. (Eds.). **Agricultura de precisão**. Viçosa: UFV, 2000. p. 1-41.

SARTORI, L.R.; IMAI, N.N.; GALO, M.L.B.T. Utilização da resposta espectral para discriminação de plantas daninhas em áreas de plantação de café. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 2005, Goiânia. **Anais...** Goiânia: INPE, 2005. p. 4303-4310.

SHIRATSUCHI, L.S.; CHRISTOFFOLETI, P.J. Aplicação localizada de herbicidas em pós-emergência na cultura de soja. **Planta Daninha**, v. 20, n. 1, p. 71-76, 2002.

SILVA, S.A. **Variabilidade espacial de atributos de solo e folhas em lavouras de café arábica utilizando análise multivariada e geoestatística**. 2009. 106 f. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) – Universidade Federal do Espírito Santo, Alegre, ES.

TELLAECHE, A.; BURGOS-ARTIZZU, X.P.; PAJARES G.; RIBEIRO, A.; FERNANDEZ-QUINTANILHA, C. A new vision-based approach to differential spraying in precision agriculture. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 60, p. 144-155, 2008.

VIEIRA, S.R. Variabilidade espacial de argila, silte e atributos químicos em uma parcela experimental de um latossolo roxo de Campinas (SP). **Bragantia**, Campinas, v. 56, n. 1, p. 1-13, 1997.

VIEIRA, S.R. Geoestatística aplicada à agricultura de precisão. In: BORÉM, A.; GIUDICE, M.P.; QUEIROZ, D.M.; MANTOVANI, E.C.; FERREIRA, L.R.; VALLE, F.X.R.; GOMIDE, R.L. (Eds.). **Agricultura de precisão**. Viçosa: UFV, 2000. p. 93-108.

WARRICK, A.W.; NIELSEN, D.R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D. (Ed.). **Applications of soil physics**. New York: Academic Press, 1980. p. 319-344.

YANG, C.; ANDERSON, G.L. Airborne videography to identify spatial plant growth variability for grain sorghum. **Characterizing Plant Growth. Precision Agriculture**, v. 1, p. 67-79, 1999.

ZIMBACK, C.R.L. **Análise espacial de atributos químicos de solos para fins de mapeamento da fertilidade do solo**. 2001. 114 f. Tese (Livre Docência) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, SP.

2. CONCLUSÃO GERAL

O objetivo deste trabalho foi desenvolver um sistema utilizando imagens digitais para mapear a porcentagem da cobertura de plantas daninhas presente nas entrelinhas em áreas agrícolas com auxílio de técnicas de geoestatística.

Este trabalho de pesquisa foi realizado em conjunto entre o laboratório PROVISAGRO (Projeto de Máquina e Visão Artificial na Agricultura) do Departamento de Engenharia Agrícola (DEA) da Universidade Federal de Viçosa e o Grupo de Investigación Reconocido de Tecnologías Avanzadas para el Desarrollo Rural Sostenible (GIR-TADRUS) do Departamento de Ingeniería Agrícola y Florestal (DIAF) da Escuela Técnica Superior de Ingenierías Agrarias (ETSIAA) da Universidad de Valladolid, campus de Palencia.

O presente trabalho foi dividido em três partes, a primeira foi a implementação dos algoritmos de aquisição dos dados e do processamento das imagens para o cálculo da porcentagem da cobertura de plantas daninhas. A segunda e terceira partes foram referentes a dois experimentos construídos para poder ser aplicado os algoritmos implementados e obter os mapas. Portanto, realizou-se a captura de imagens digitais e coordenadas sobre as áreas experimentais e em seguida efetuou-se o processamento das imagens e calculou-se a porcentagem da cobertura de plantas daninhas. Como foram realizadas amostras das áreas, a partir dos valores obtidos juntamente com as

coordenadas foi possível construir os mapas das áreas de estudo, com auxílio das técnicas de geoestatística.

O primeiro experimento foi conduzido em uma área experimental de 0,8 hectares, pertencente à Universidade Federal de Viçosa (UFV) na cidade de Coimbra, MG. Esta área estava sob manejo de irrigação constituído por um pivô central, e a cultura implantada foi feijão, cultivar ouro vermelho, utilizando os sistemas de plantio direto e convencional, cada um ocupando metade da área.

O segundo experimento foi conduzido em uma área de propriedade particular de Francisco Javier Gómez Gil, de aproximadamente 1,2 hectares, localizada em Aguilar de Bureba na Província de Burgos, Espanha. Esta área foi cultivada com girassol, sob o sistema de plantio convencional, sem nenhum sistema de irrigação.

Dessa forma, com base nos estudos desenvolvidos, pode-se concluir que:

- O sistema desenvolvido promoveu a captura de imagens e coordenadas simultaneamente e calculou o percentual da cobertura de plantas daninhas nas entrelinhas.
- O tipo da câmera utilizada influenciou diretamente na performance dos algoritmos de processamento das imagens.
- Por meio de imagens digitais e técnicas de processamento de imagens e de geoestatística foi possível mapear o percentual da cobertura de plantas daninhas nas entrelinhas em uma área cultivada com feijão sob os sistemas de plantio direto e convencional.
- As técnicas de geoestatística utilizadas possibilitaram o ajuste de modelos adequados aos dados e a construção de mapas de porcentagem da cobertura de plantas daninhas nos dois tipos de sistemas de plantio (direto e convencional) e nas duas câmeras (RGB e NIR) estudados.
- As imagens RGB foram as mais indicadas para mapear a porcentagem da cobertura de plantas daninhas nas entrelinhas para ambos os sistemas de plantio, pois apresentaram melhor contraste entre plantas e solo ou palhada em relação às imagens NIR.
- Os diferentes tipos de sistemas de plantio influenciaram na variabilidade e intensidade da infestação de plantas daninhas ao longo das áreas de estudo

e conseqüentemente no mapeamento, sendo que o sistema de plantio direto proporcionou menores erros no processamento das imagens em ambas as câmeras utilizadas e maior uniformidade da cobertura de plantas daninhas.

- Com o uso de imagens digitais e técnicas de processamento de imagens e de geoestatística foi possível mapear o percentual da cobertura de plantas daninhas nas entrelinhas em uma área de cultivo de girassol sob o plantio convencional.
- As técnicas de geoestatística utilizadas possibilitaram o ajuste de modelos adequados aos dados e a construção de mapas de porcentagem da cobertura de plantas daninhas com as duas câmeras (Marlin e Cyber-shot), nas duas alturas de posicionamento das câmeras (3 e 4 m) e nos dois estádios de crescimento da cultura testados (37 e 46 DAP).
- As imagens da câmera Cyber-shot foram as mais indicadas para mapear a porcentagem da cobertura de plantas daninhas nas entrelinhas para ambos os estádios de crescimento e alturas estudadas, pois apresentaram melhor contraste entre plantas e solo em relação às imagens da câmera Marlin.
- As diferenças nas alturas de posicionamento das câmeras testadas não mostraram ser um fator de grande influência no mapeamento da porcentagem da cobertura de plantas daninhas.

REFERÊNCIAS

ANTUNIASSI, U.R. Agricultura de precisão: aplicação localizada de agrotóxicos. In: TECNOLOGIA E SEGURANÇA NA APLICAÇÃO DE AGROTÓXICOS, 1998, Santa Maria. **Anais...** Santa Maria: UFSM, 1998. p. 53-63.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS DE QUÍMICA FINA, BIOTECNOLOGIA E SUAS ESPECIALIDADES – ABIFINA. **Defensivos agrícolas**. Disponível em: <<http://www.abifina.org.br>>. Acesso em: 2 fev. 2010.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE DEFESA VEGETAL – ANDEF. **Defensivos agrícolas**. Disponível em: <<http://www.undef.com.br/defensivos/index.asp?cod=1>>. Acesso em: 5 fev. 2010.

BAIO, F.H.R. **Aplicação localizada de defensivos baseada na variabilidade espacial das plantas daninhas**. 2001. 113 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, SP.

BALASTREIRE, L.A.; BAIO, F.H.R. Avaliação de uma metodologia prática para o mapeamento de plantas daninhas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 5, n. 2, p. 349-352, 2001.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Disponível em: <http://www.agricultura.gov.br/portal/page?_pageid=33,968707&_dad=portal&_schema=PORTAL>. Acesso em: 15 dez. 2009.

BRIGHENTI, A.M.; MORAES, V.J.; OLIVEIRA JÚNIOR, R.S.; GAZZIERO, D.L.P.; VOLL, E.; GOMES, J.A. Persistência e fitotoxicidade do herbicida atrazine aplicado na cultura do milho sobre a cultura do girassol em sucessão. **Planta Daninha**, v. 20, n. 2, p. 291-297, 2002.

BRIGHENTI, A.M.; CASTRO, C.; OLIVEIRA JÚNIOR., R.S.; SCAPIM, C.A.; VOLL, E.; GAZZIERO, D.L.P. Períodos de interferência de plantas daninhas na cultura do girassol. **Planta Daninha**, v. 22, n. 2, p. 251-257, 2004.

CHRISTENSEN, S.; NORDBO, E.; KRISTENSEN, K. Weed cover mapping with spectral reflectance measurements. **Aspects of Applied Biology**, n. 37, p. 171-179, 1993.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB. **Acompanhamento de safra brasileira**: grãos, intenção de plantio, segundo levantamento. Brasília, 2009. 39 p.

CONCENÇO, G.; LOPES, N.F.; ANDRES, A.; MORAES, D.M.; SANTOS, M.Q.; RIEFFEL FILHO, J.A.; VILELLA, J.V. Controle de plantas daninhas em arroz irrigado em função de doses de herbicidas pré-emergentes e início da irrigação. **Planta Daninha**, v. 24, n. 2, p. 303-309, 2006.

CONGALTON, R.G. A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. **Remote Sensing of Environment**, n. 37, p. 35-46, 1991.

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

DUDA, R.O.; HART, P.E. Use of the Hough transformation to detect lines and curves in pictures. **Communications of the ACM**, v. 15, n. 1, p. 11-15, 1972.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Disponível em: <http://www.embrapa.br/linhas_de_acao/alimentos/prod_animal/index_html/mostra_documento>. Acesso em: 14 mar. 2009.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Disponível em: <<http://www.cnpms.embrapa.br/publicacoes/sorgo/plantasdaninha.htm>>. Acesso em: 4 fev. 2010.

ESPINOSA, A.T.; PONCE, A.J.R.; REYES, M.M. Desarrollo de *software* para el manejo de información catastral. **Reportes Técnicos en Ingeniería del Software**, v. 9, n. 1, p. 1-13, 2007.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS – FAO. Disponível em: <<http://www.fao.org/news/story/en/item/29402/icode/>>. Acesso em: 11 jan. 2010.

GÉE, C.; BOSSU, J.; JONES, G.; TRUCHETET, F. Crop/weed discrimination in perspective agronomic images. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 60, p. 49-59, 2008.

GOEL, P.K.; PRASHER, S.O.; LANDRY, J.A.; PATEL, R.M.; BONNELL, R.B.; VIAU, A.A.; MILLER, J.R. Potential of airborne hyperspectral remote sensing to detect nitrogen deficiency and weed infestation in corn. **Computers and Eletronics in Agriculture**, v. 38, n. 2, p. 99-124, 2003.

GOMES, O.F.M. **Processamento e análise de imagens aplicados à caracterização automática de materiais**. 2001. 151 f. Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia Metalúrgica) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ.

HUDSON, W.D.; RAMM, C.W. Correct formulation of the kappa coefficient of agreement. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 53, n. 4, p. 421-422, 1987.

JAKELAITIS, A.; FERREIRA, L.R.; SILVA, A.A.; AGNES, E.L.; MIRANDA, G.V.; MACHADO, A.F.L. Efeitos de sistemas de manejo sobre a população de tiririca. **Planta Daninha**, v. 21, n. 1, p. 89-95, 2003.

KOZLOWSKI, L.A.; RONZELLI JÚNIOR, P.; PURISSIMO, C.; DAROS, E.; KOEHLER, H.S. Período crítico de interferência das plantas daninhas na cultura do feijoeiro-comum em sistema de semeadura direta. **Planta Daninha**, v. 20, n. 2, p. 213-220, 2002.

LAMB, D.W.; BROWN, R.B. Remote sensing and mapping of weeds in crops. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 78, p. 117-125, 2001.

LANDIS, J.R.; KOCH, G.G. The measurement of observer agreement for categorical data. **Biometrics**, v. 33, n. 1, p. 159-174, 1977.

MACHADO, A.F.L.; CAMARGO, A.P.M.; FERREIRA, L.R.; SEDIYAMA, T.; FERREIRA, F.A.; VIANA, R.G. Misturas de herbicidas no manejo de plantas daninhas na cultura do feijão. **Planta Daninha**, v. 24, n. 1, p. 107-114, 2006.

MATEUS, G.P.; CRUSCIOL, C.A.C.; NEGRISOLI, E. Palhada do sorgo de guiné gigante no estabelecimento de plantas daninhas em área de plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 39, n. 6, p. 539-542, 2004.

MENESES, P.R. Fundamentos da radiometria óptica espectral. In: MENESES, P.R.; MADEIRA NETTO, J.S. (Ed.). **Sensoriamento remoto: reflectância dos alvos naturais**. Brasília: UnB; Planaltina: Embrapa Cerrados, 2001. cap. 1, p. 15-39.

QUEIROZ, D.M.; DIAS, G.P.; MANTOVANI, E.C. Agricultura de precisão na produção de grãos. In: BORÉM, A.; GIUDICE, M.P.; QUEIROZ, D.M.; MANTOVANI, E.C.; FERREIRA, L.R.; VALLE, F.X.R.; GOMIDE, R.L. (Eds.). **Agricultura de precisão**. Viçosa: UFV, 2000. p. 1-41.

MOLIN, J.P. Agricultura de precisão: fundamentos e estado atual da arte. In: CÂMARA, G.M. **Soja: tecnologia da produção II**. Piracicaba: ESALQ/ Departamento de Produção Vegetal, 2000. p. 423-437.

PIERCE, F.J.; NOWAK, P. Aspects of precision agriculture. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 67, p. 1-85, 1999.

PITELLI, R.A. Competição e controle das plantas daninhas em áreas agrícolas. **Série Técnica IPEF**, v. 4, n. 12, p. 1-24, 1987.

ROBERT, P.C. Precision agriculture: a challenge for crop nutrition management. **Plant and Soil**, v. 247, p. 143-149, 2002.

RONCHI, C.P.; TERRA, A.A.; SILVA, A.A.; FERREIRA, L.R. Acúmulo de nutrientes pelo cafeeiro sob interferência de plantas daninhas. **Planta Daninha**, v. 21, n. 2, p. 219-227, 2003.

SARTORI, L.R.; IMAI, N.N.; GALO, M.L.B.T. Utilização da resposta espectral para discriminação de plantas daninhas em áreas de plantação de café. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 2005, Goiânia. **Anais...** Goiânia: INPE, 2005. p. 4303-4310.

SCHUSTER, I.; NORDMEYER, H.; RATH, T. Comparison of vision-based and manual weed mapping in sugar beet. **Biosystems Engineering**, v. 98, n. 1, p. 17-25, 2007.

SENAY, G.B.; WARD, A.D.; LYON, J.G. Manipulation of high spatial resolution aircraft remote sensing data for use in site-specific farming. **Transactions of the ASAE**, v. 41, n. 2, p. 489-495, 1998.

SHIRATSUCHI, L.S. **Mapeamento da variabilidade espacial das plantas daninhas com a utilização de ferramentas da agricultura de precisão**. 2001. 96 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, SP.

SHIRATSUCHI, L.S.; CHRISTOFFOLETI, P.J. Aplicação localizada de herbicidas em pós-emergência na cultura de soja. **Planta Daninha**, v. 20, n. 1, p. 71-76, 2002.

SILVA, S.A. **Variabilidade espacial de atributos de solo e folhas em lavouras de café arábica utilizando análise multivariada e geoestatística.** 2009. 106 f. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) – Universidade Federal do Espírito Santo, Alegre, ES.

SILVA, A.A.; SILVA, J.F. **Tópicos em manejo de plantas daninhas.** Viçosa: UFV, 2007. 367 p.

STAFFORD, J.V. Implementing precision agriculture in the 21st century. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 76, p. 267-275, 2000.

SUI, R.; THOMASSON, J.A.; HANKS, J.; WOOTEN, J. Ground-based sensing system for weed mapping in cotton. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 60, n. 1, p. 31-38, 2008.

TELLAECHE, A.; BURGOS-ARTIZZU, X.P.; PAJARES, G.; RIBEIRO, A.; FERNÁNDEZ-QUINTANILLA, C. A new vision-based approach to differential spraying in precision agriculture. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 60, p. 144-155, 2008.

TSCHIEDEL, M.; FERREIRA, M.F. Introdução à agricultura de precisão: conceitos e vantagens. **Ciência Rural**, v. 32, n. 1, p. 159-163, 2002.

VIEIRA, S.R. Variabilidade espacial de argila, silte e atributos químicos em uma parcela experimental de um Latossolo roxo de Campinas (SP). **Bragantia**, Campinas, v. 56, n. 1, p. 1-13, 1997.

VIEIRA, S.R. Geoestatística aplicada à agricultura de precisão. In: BORÉM, A.; GIUDICE, M.P.; QUEIROZ, D.M.; MANTOVANI, E.C.; FERREIRA, L.R.; VALLE, F.X.R.; GOMIDE, R.L. (Eds.). **Agricultura de precisão.** Viçosa: UFV, 2000. p. 93-108.

WARRICK, A.W.; NIELSEN, D.R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D. (Ed.). **Applications of soil physics.** New York: Academic Press, 1980. p. 319-344.

WOEBBECKE, D.M.; MEYER, G.E.; VON BARGEN, K.; MORTENSEN, D.A. Color indices for weed identification under various soil, residue, and lightning conditions. **Transactions of ASAE**, v. 38, n. 1, p. 259-269, 1995.

YANG, X.; BEYENAL, H.; GARY, H.; LEWANDOWSKI, Z. Evaluation of biofilm image thresholding methods. **Water Research**, v. 35, p. 1149-1158, 2001.

ZIMBACK, C.R.L. **Análise espacial de atributos químicos de solos para fins de mapeamento da fertilidade do solo.** 2001. 114 f. Tese (Livre Docência) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, SP.

APÊNDICES

APÊNDICE A

DIAGRAMA DE BLOCOS DA “AQUISIÇÃO DOS DADOS”

As Figuras 1A a 7A apresentam todo o diagrama de blocos da parte de aquisição dos dados do SVA com suas funções constituintes. Em cada imagem a parte superior sombreada refere-se à visão completa do diagrama e a parte logo abaixo desta região representa a visão ampliada da área retangular destacada em branco na parte sombreada.

O início do algoritmo responsável pela aquisição dos dados enviados ao sistema pelo GPS é apresentado pela Figura 1A.

Primeiramente foram utilizadas funções que efetuam a configuração da porta serial a qual o GPS foi conectado e que ajustam o espaço de memória (buffer) a ser reservado para as informações recebidas. Em seguida, os dados são manipulados de forma a selecionar apenas a sentença RMC. Esta sentença é composta de várias informações como data, hora, latitude, longitude, velocidade, entre outras e para separá-las foram desenvolvidas funções as quais estão apresentadas nas Figuras 2A e 3A.

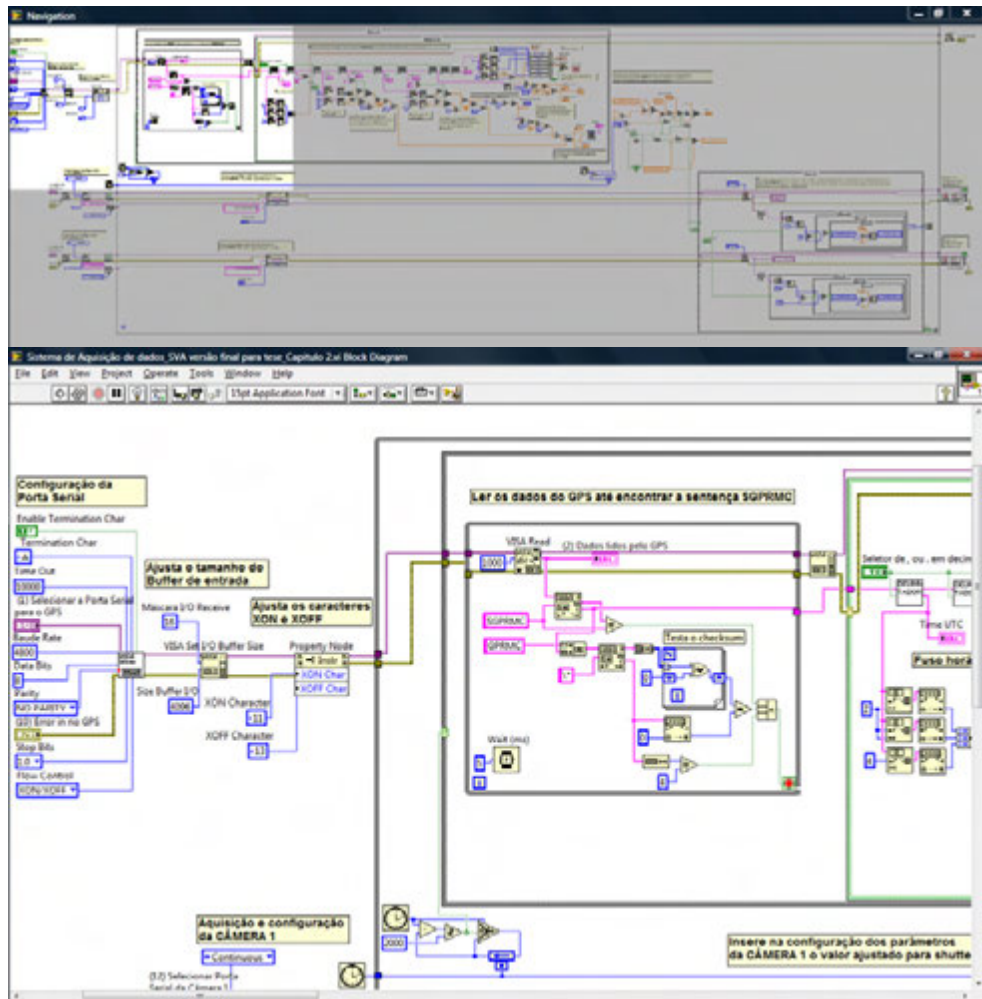


Figura 1A – Diagrama de blocos do início do algoritmo de aquisição dos dados pelo SVA enviados pelo GPS.

As informações da sentença são separadas por vírgulas, portanto, para separá-las foi construída uma função representada pelo bloco chamado “DELIMITADOR”, destacado na Figura 2A por uma seta vermelha. Esta função identificava o caractere da vírgula e com isso descobria-se o início e fim de cada informação. Esta mesma função também efetuava a mudança do sistema de separação de casas decimais, alterando ponto por vírgula aos valores das informações enviadas pelo GPS. Esta alteração ocorrerá dependendo do sistema de separação selecionado pelo botão 9 (Figura 6 do capítulo 1), para que não apareçam erros na visualização dos dados ocasionados pela configuração regional do idioma definida no computador.

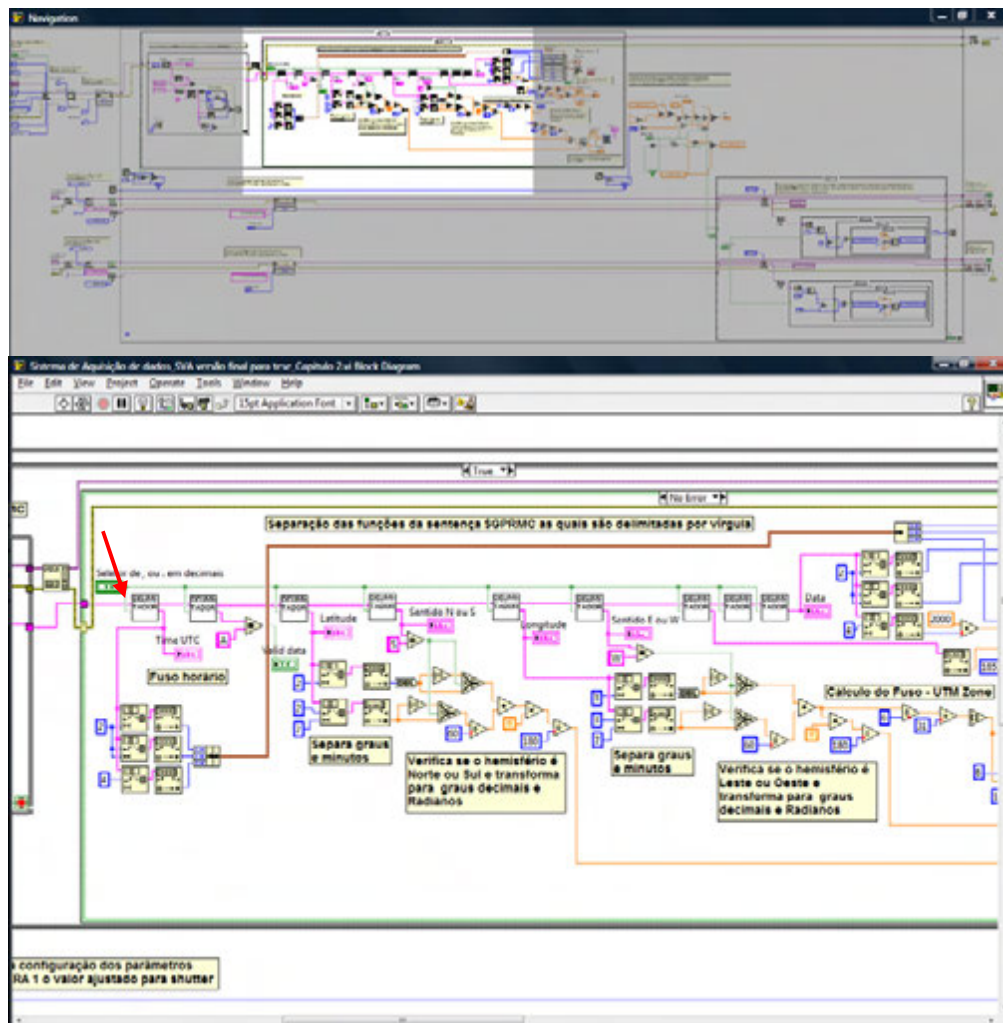


Figura 2A – Diagrama de blocos do início da separação das informações da sentença RMC.

As informações identificadas e visualizadas na Figura 2A foram o fuso horário, o dígito verificador da validade dos dados, a latitude e seu hemisfério, a longitude também com seu hemisfério correspondente, sendo que algumas operações foram realizadas para separar graus e minutos nos valores da latitude e longitude, para transformar em graus decimais e radianos e para verificar os respectivos hemisférios, pois isto afetará no sinal dos valores.

Na Figura 3A está apresentado o fechamento da estrutura de separação das informações da sentença RMC, onde se obtém a data e hora local, a velocidade já ajustada para metros por segundo e o cálculo do meridiano central e da distância angular para a execução da função da

conversão de latitude e longitude para UTM. Esta função de conversão é representada pelo bloco Lat-Long UTM, sinalizado por uma seta vermelha, presente nesta mesma figura, sendo que seu algoritmo está apresentado na Figura 4A.

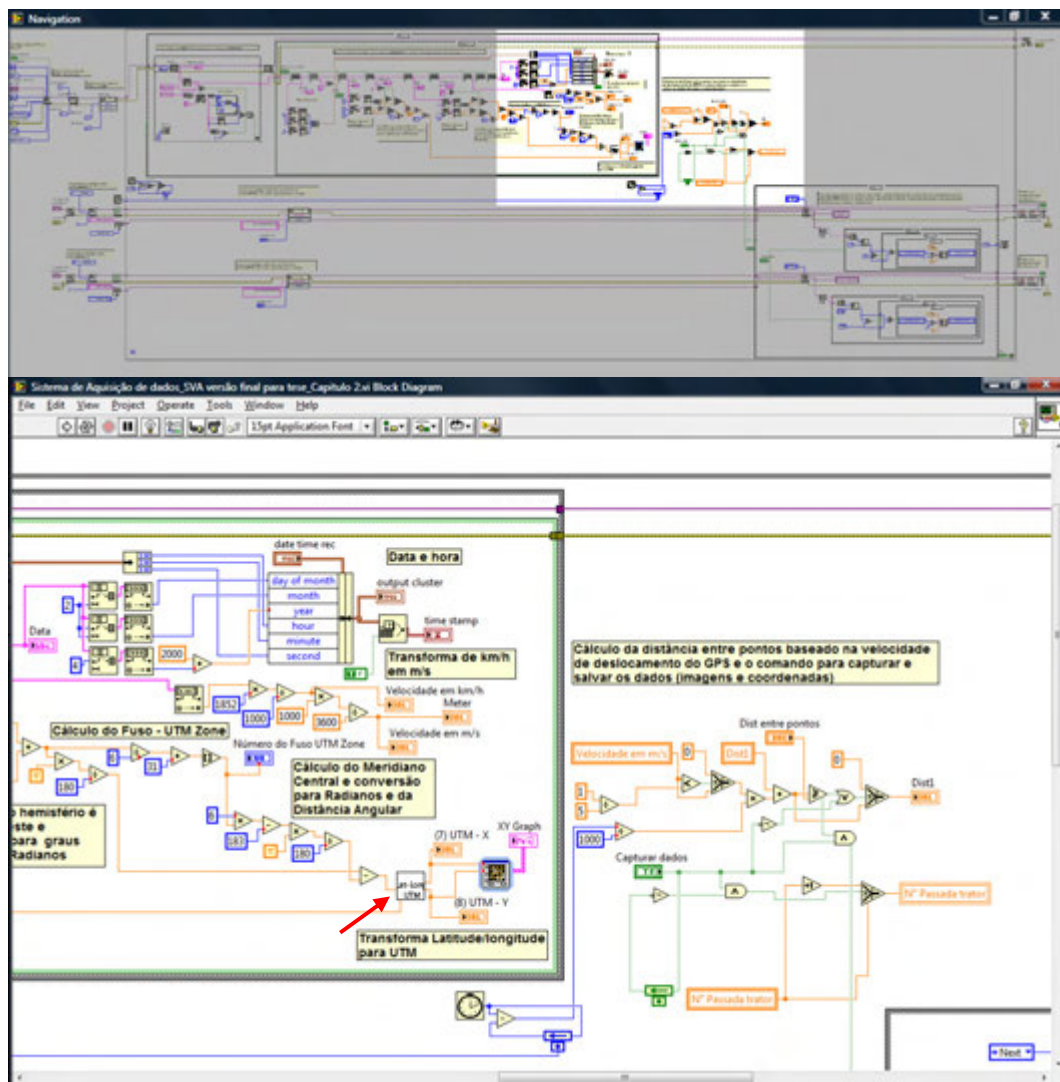


Figura 3A – Diagrama de blocos do término da separação das informações da sentença RMC e cálculo do momento da captura automática dos dados.

Na Figura 3A também está apresentada a lógica desenvolvida para definir automaticamente o momento da captura dos dados mediante a distância regular definida entre pontos. Esta lógica utiliza o valor da velocidade recebido informado pelo GPS e a distância entre pontos selecionada pelo usuário na tela do painel de controle. Com esses valores calcula-se o intervalo de tempo de cada captura e envia o sinal de permissão para gravação das imagens e das coordenadas.

Na Figura 4A está apresentado todo o algoritmo de conversão do sistema de coordenadas geográficas (latitude e longitude) para UTM, ou seja, todas as equações de Coticchia-Surace implementadas, encerrando a parte de processamento dos dados enviados pelo GPS. Os parâmetros “a” e “b” são fixos e baseados nos eixos do elipsóide do sistema de coordenadas cartográficas mundial WGS84. Os valores das coordenadas UTM (X e Y) são fornecidos já em metros.

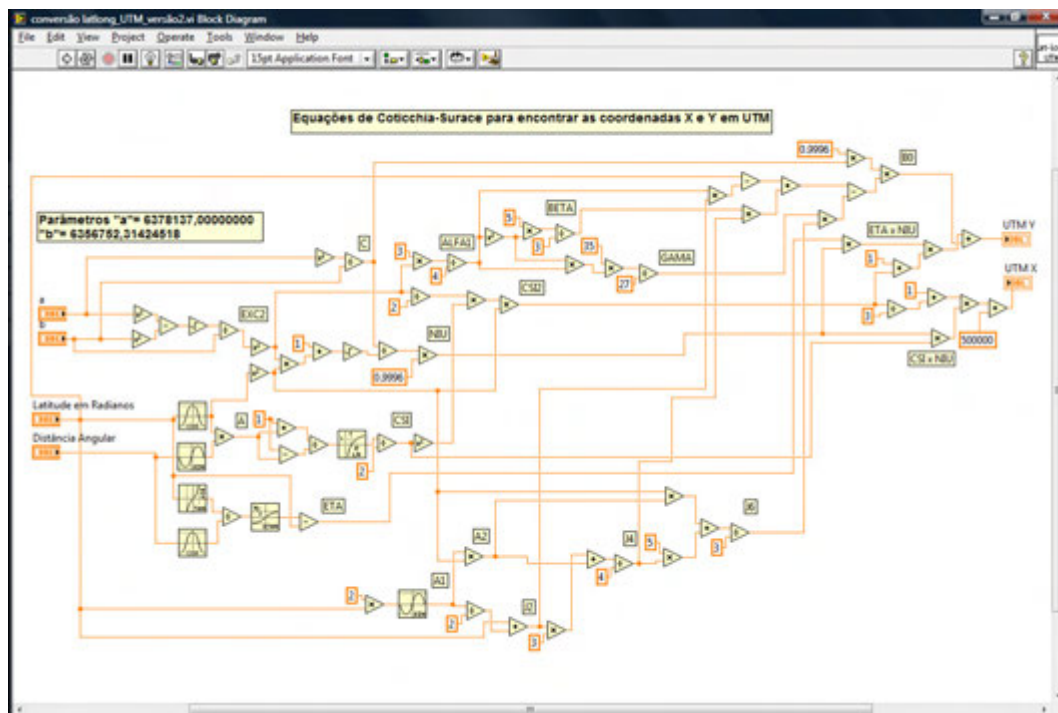


Figura 4A – Diagrama de blocos que converte o sistema de coordenadas geográficas latitude e longitude para o sistema UTM (equações de Coticchia-Surace).

O passo seguinte se refere à aquisição das imagens (Figura 5A). A primeira etapa deste passo consistiu em efetuar comunicação com as câmeras, configurar o tipo de aquisição, se vai ser contínuo ou por disparos, configuração do obturador eletrônico (shutter) das câmeras e por fim adquirir as imagens.

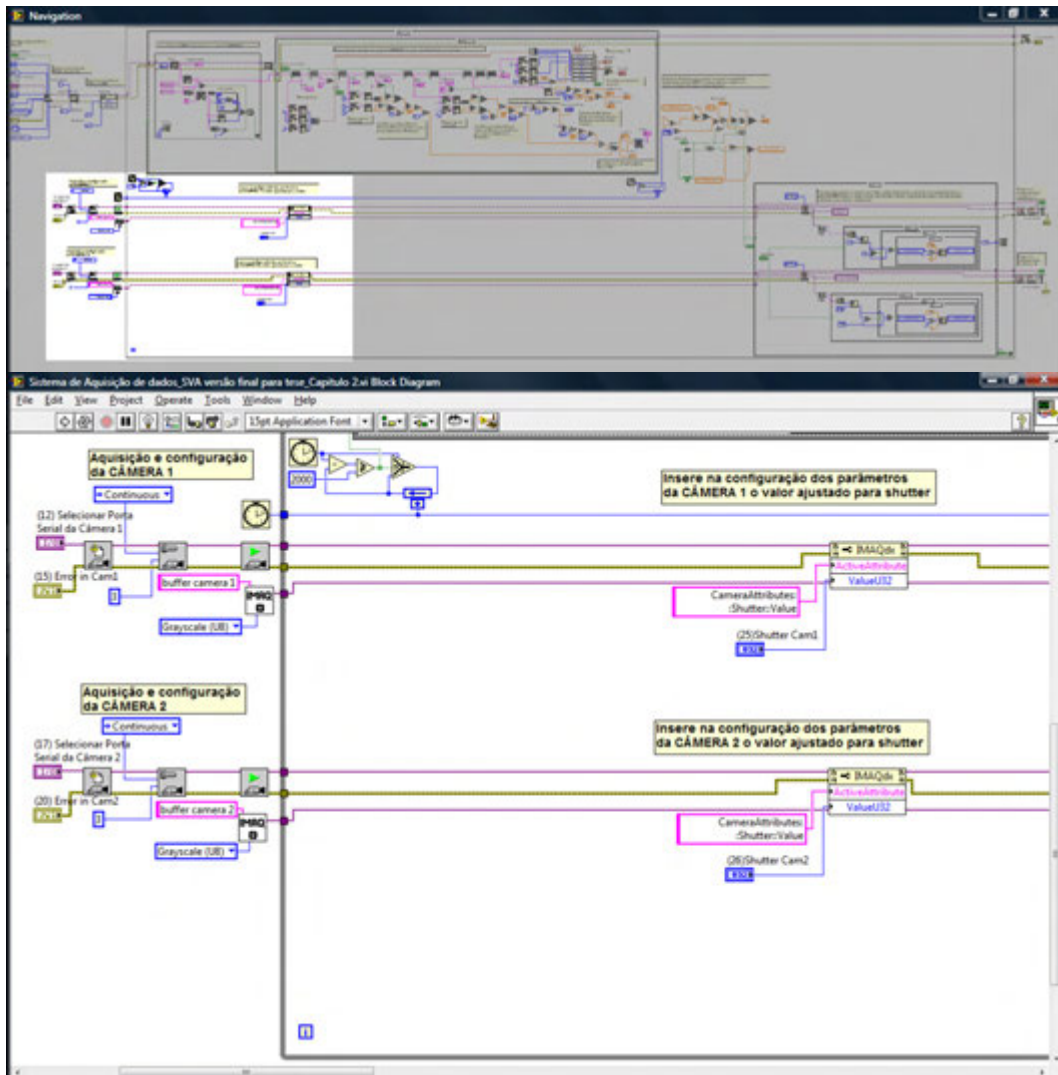


Figura 5A – Diagrama de blocos da parte referente à aquisição das imagens.

O obturador eletrônico é um parâmetro relacionado com o tempo de exposição do sensor à luz, e este deve variar em função da quantidade de luz que sensibiliza o sensor e na qualidade da imagem formada. Neste SVA construído é possível ajustar o valor do obturador eletrônico manualmente, inserindo o valor nos campos de número 25 e 26 da tela do painel de controle do SVA (Figura 6 do capítulo 1) ou automaticamente, inserindo um valor inicial e pressionando o botão 27.

O modo automático do obturador eletrônico é apresentado pela Figura 6A. Este modo funcionava aumentando ou o valor do obturador eletrônico, partindo de um valor inicial, mediante a quantidade de *pixels* saturados nas imagens. Esta quantidade de *pixel* foi definida em testes preliminares em campo e na observação da qualidade das imagens. Os valores definidos foram, respectivamente, 10 e 1000 para as câmeras 1 e 2, sendo o primeiro ajustado para uma câmera infravermelha e outro para uma colorida. Esta função de modo automático efetuava os ajustes nos intervalos de tempo entre as capturas.

A Figura 6A também apresenta as funções responsáveis pela visualização das imagens nas telas de visualização das imagens (displays) do painel de controle e de encerramento do funcionamento das câmeras e limpeza dos espaços de memórias (buffers).

A estrutura apresentada pela Figura 7A representa as funções para efetuar o armazenamento de todos os dados em arquivo texto e também a visualização das imagens nas telas de visualização das imagens do painel de controle. Outra aplicação presente nesta imagem, além do fim do funcionamento das câmeras, é a de zerar a contagem das imagens, caso aconteça algum problema e for necessário reiniciar a captura.

Este passo, apresentado na Figura 7A, ocorria somente no momento exato da captura dos dados, ou seja, quando o passo anterior (Figura 6A) não estava operando.

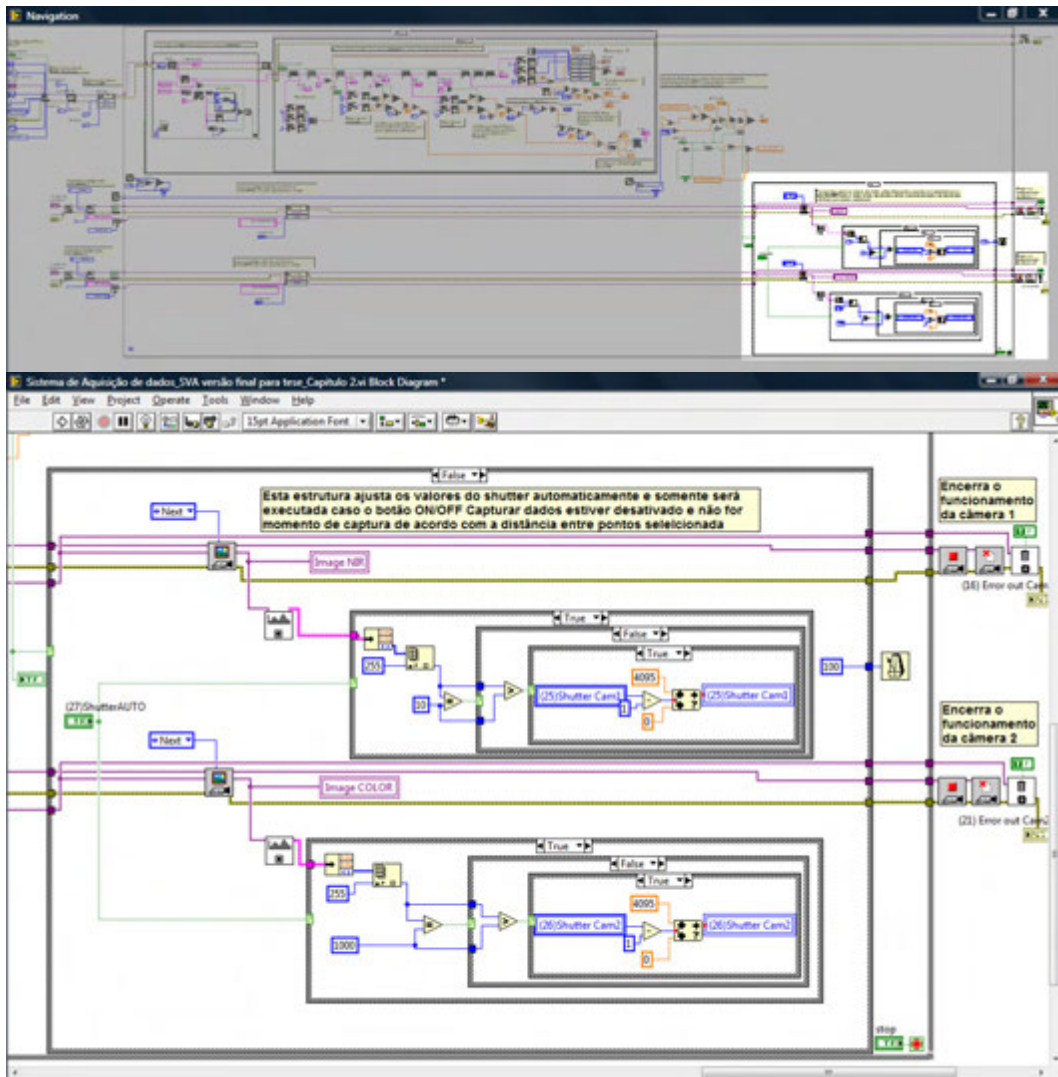


Figura 6A – Diagrama de blocos da função do obturador eletrônico automático.

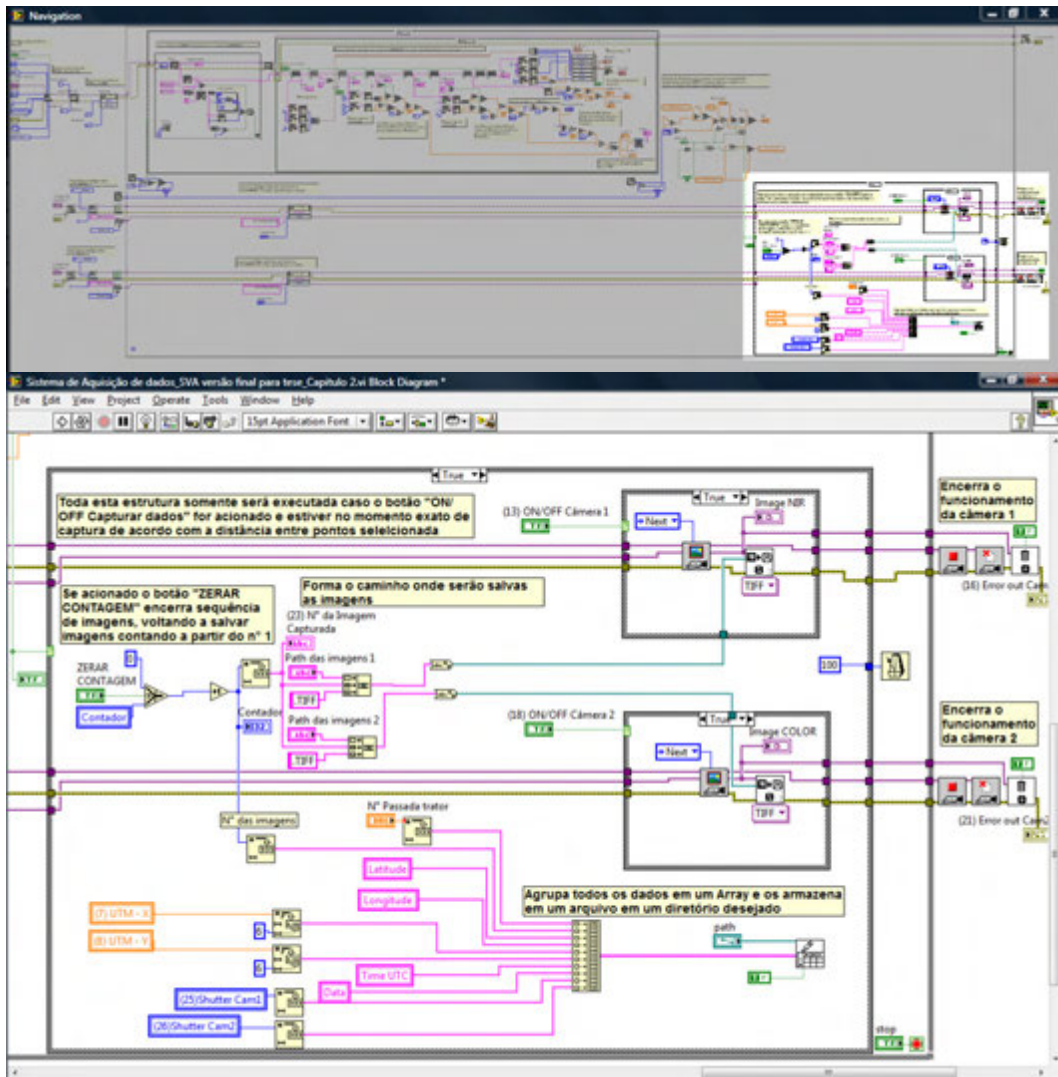


Figura 7A – Diagrama de blocos da parte de visualização das imagens e armazenamento dos dados.

APÊNDICE B

DIAGRAMA DE BLOCOS DO PROCESSAMENTO DAS IMAGENS: LIMIARIZAÇÃO

As Figuras 1B a 3B apresentam passo a passo todo o diagrama de blocos da parte deste processamento inicial das imagens do SVA. Em cada imagem a parte superior sombreada refere-se à visão completa do diagrama e a parte logo abaixo desta região refere-se a uma visão ampliada da área retangular destacada em branco na parte sombreada.

O primeira passo, que está destacado pela Figura 1B, refere-se ao carregamento das imagens no sistema, criação de espaço na memória (buffers) para receber as bandas das imagens, todos os cálculos e procedimentos para a transformação das imagens RGB em ExG (equações de 8 a 11 implementadas no capítulo 1) e visualização de todas as imagens no painel de controle.

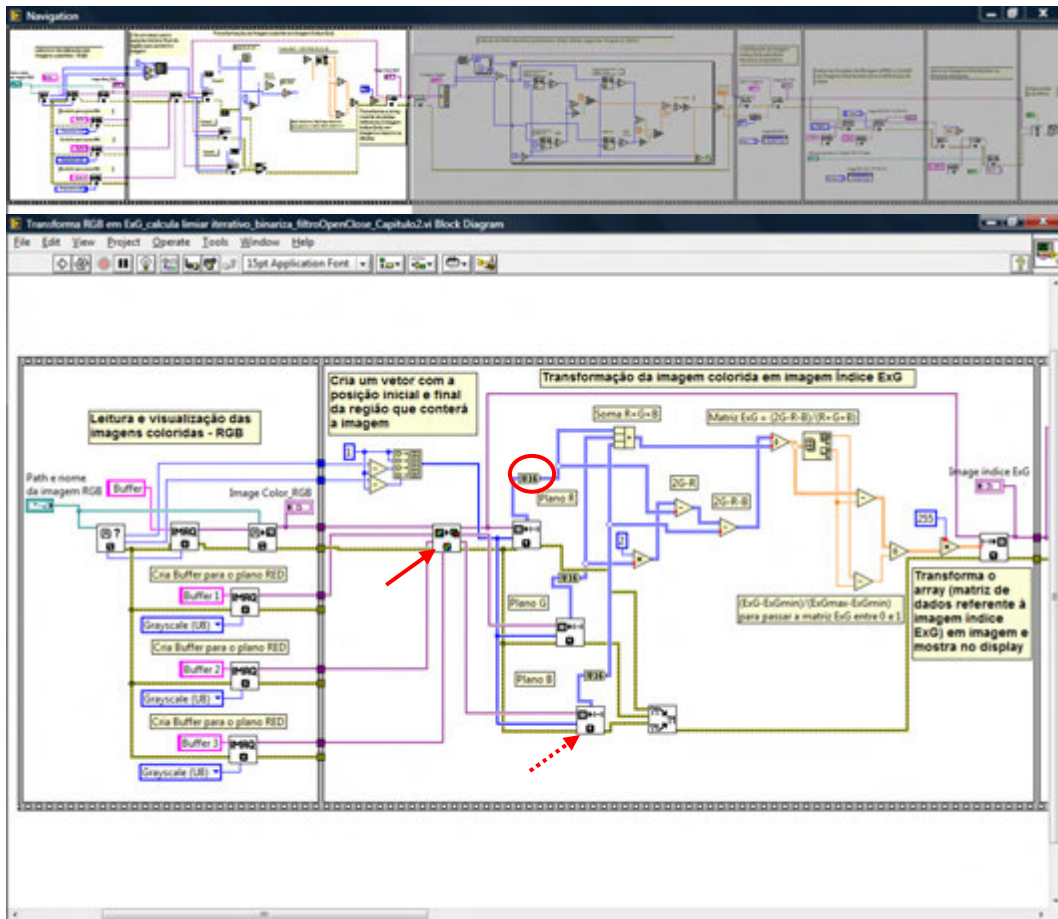


Figura 1B – Diagrama de blocos da parte inicial do processo de limiarização e a transformação de imagem RGB para imagem índice excesso de verde (ExG).

Para efetuar a transformação da imagem RGB em ExG, primeiramente foi necessário separar as três bandas para os cálculos poderem ser feitos, sendo que cada banda exige um espaço de memória (buffers) separado. Na Figura 1B, o bloco responsável pela função que faz essa separação das bandas está sinalizado por uma seta vermelha. É possível também visualizar nesta figura o fechamento de seções definidas por retângulos em seqüência. Este tipo de estrutura faz com que os dados só passem para a seção seguinte após a execução de todos os passos da seção atual.

Quando se efetua qualquer manipulação ou cálculo com imagens é necessário primeiramente, transformá-las em matrizes de números. No algoritmo construído no diagrama de blocos da Figura 1B, o bloco que efetua esta transformação está sinalizado por uma seta tracejada vermelha.

Após a imagem ser limiarizada, os dados pertencentes desta imagem passam para a seção seguinte para serem processados, conforme apresenta a Figura 3B. Essa seção aplica as operações morfológicas de abertura (OPEN) e fechamento (CLOSE) consecutivamente, para remover os prováveis ruídos gerados na limiarização, atuando como filtros. Em seguida, as imagens filtradas são armazenadas no diretório especificado pelo usuário na tela do painel de controle (Figura 7 do capítulo 1), para serem utilizadas na etapa seguinte do processamento de imagens, que consiste na identificação da direção das linhas de cultura pela transformada de Hough e rotação das imagens.

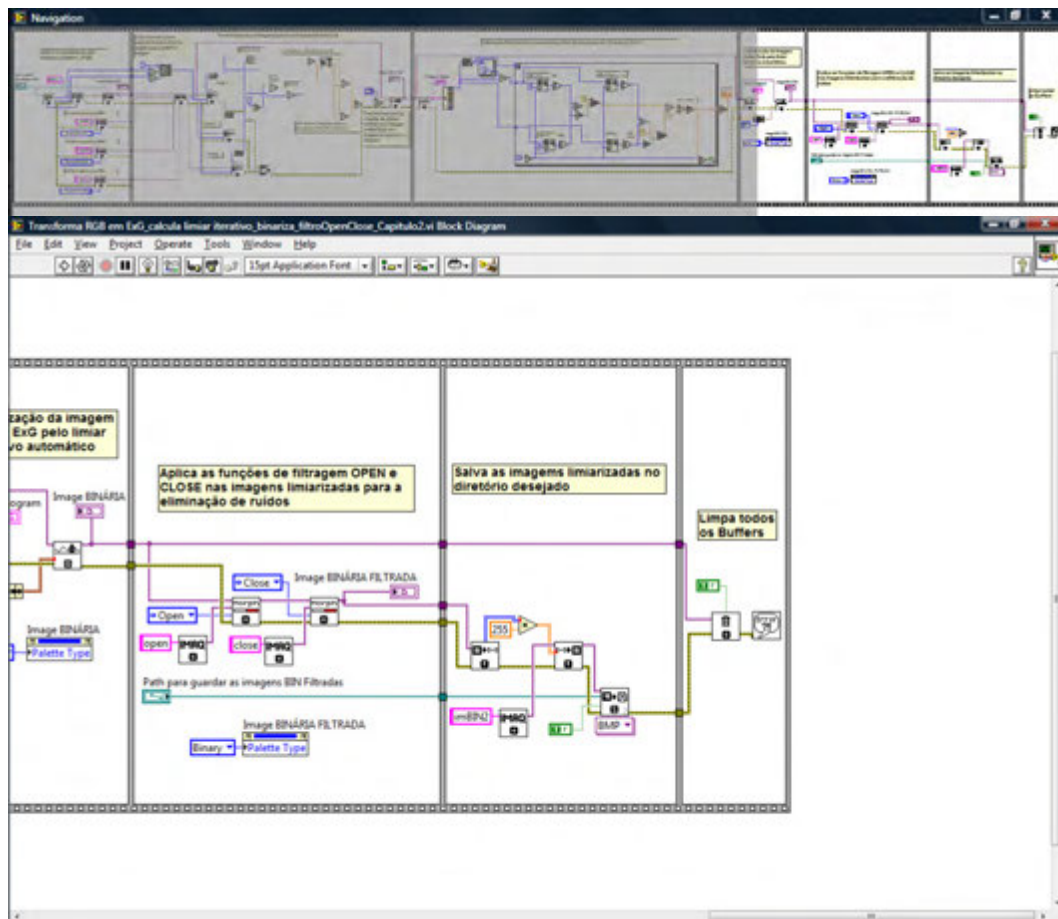


Figura 3B – Diagrama de blocos da aplicação das operações morfológicas de abertura (OPEN) e fechamento (CLOSE), do armazenamento das imagens e da limpeza dos buffers.

A última seção da Figura 3B apresenta a função que limpa todos os espaços de memórias (buffers), liberando espaço para que novas imagens possam ser processadas e nenhuma informação anterior prejudique ou altere os dados das informações atuais.

APÊNDICE C

DIAGRAMA DE BLOCOS DO PROCESSAMENTO DAS IMAGENS: IDENTIFICAÇÃO DO ÂNGULO DE INCLINAÇÃO DAS LINHAS DE CULTURA E ROTAÇÃO DAS IMAGENS

As Figuras 1C a 4C apresentam os passos no diagrama de blocos para implementação da Transformada de Hough e rotação das imagens no SVA.

Novamente a parte superior sombreada destas imagens apresenta à visão completa do diagrama e a parte inferior apresenta uma visão ampliada da área retangular destacada em branco na parte sombreada.

Inicialmente o diagrama da Figura 1C apresenta as funções que efetuam o carregamento das imagens limiarizadas e filtradas no SVA. Em seguida, são calculados os senos e cossenos dos ângulos 0 a 179, pois estes valores serão utilizados posteriormente na implementação da transformada de Hough. A última seção presente nesta figura apresenta as funções responsáveis por construir a máscara circular e dar início ao cálculo do valor máximo de ρ (rho).

A continuação deste algoritmo pode ser visualizada pela Figura 2C.

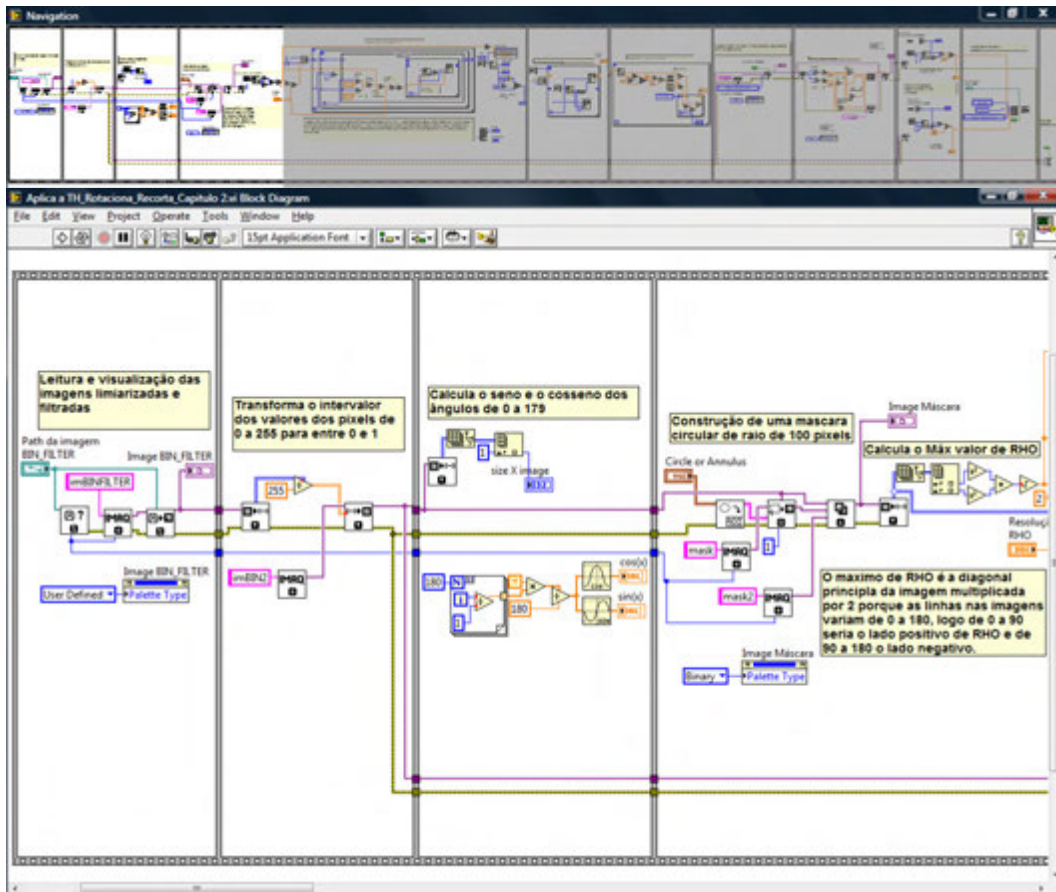


Figura 1C – Diagrama de blocos inicial da parte de identificação do ângulo de inclinação das linhas de cultura pela Transformada de Hough.

Na Figura 2C estão apresentados os cálculos da construção da matriz acumuladora, que é a matriz ρ (rho) x θ (teta), a qual se encontra os números de intercessões das curvas no plano rho x teta, ou seja, os valores dos pontos colineares no plano X Y. Esta matriz acumuladora contém os valores máximos de intercessões para rho e teta, denominados de rho máximo e teta máximo, possibilitando o cálculo do ângulo de rotação das imagens. Este ângulo de rotação tem o valor de teta máximo até 90 graus, entretanto a partir de 91 graus o ângulo de rotação será o valor de Teta máximo subtraído de 180, ou seja, será negativo.

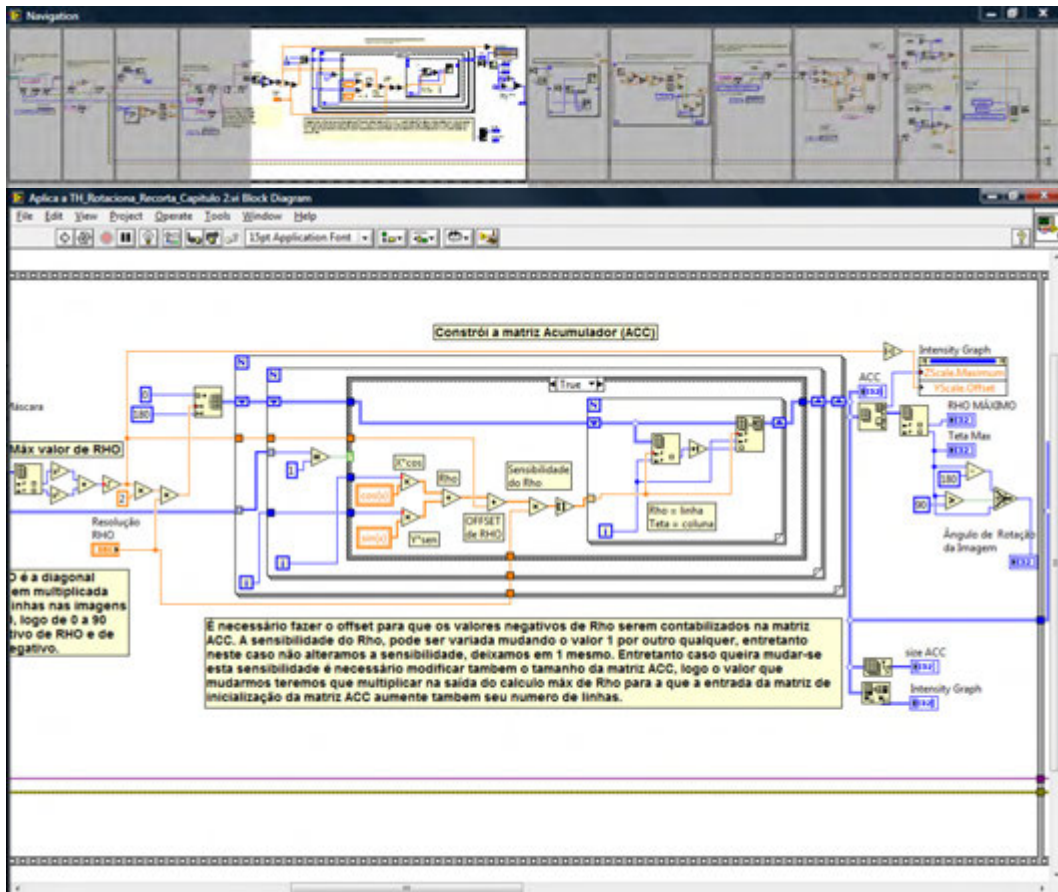


Figura 2C – Diagrama de blocos da construção da matriz acumulador, obtenção do ρ (rho) e θ (teta) máximos e do ângulo de rotação das imagens.

A Figura 3C apresenta o diagrama de blocos da construção da matriz de máximos do acumulador, que é uma matriz onde os valores são posicionados de forma decrescente, do maior para o menor de cima para baixo na tabela. Também estão apresentados o cálculo para obtenção dos valores de X e Y utilizando a equação 12 do capítulo 1 e os valores de rho e teta da matriz de máximos do acumulador e por último o algoritmo responsável pela rotação das imagens.

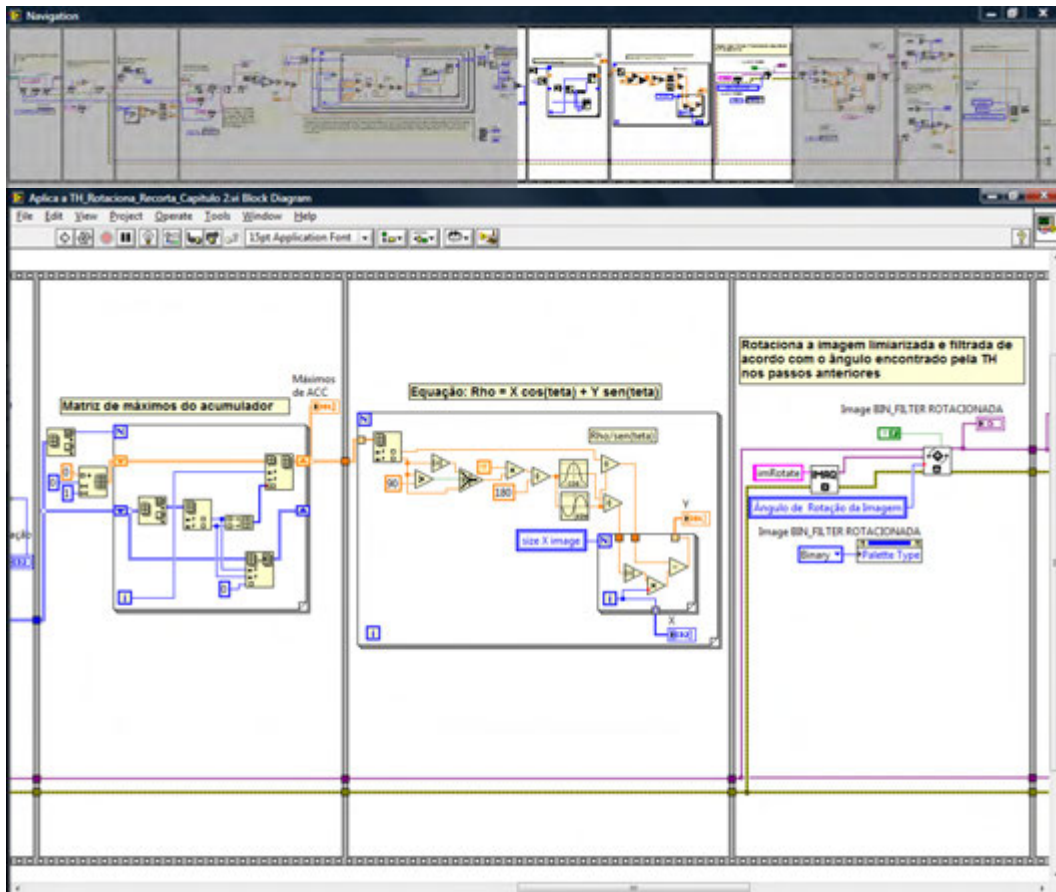


Figura 3C – Diagrama de blocos da construção da matriz de máximos do acumulador, dos valores de X e Y da equação 13 do capítulo 1 e do ângulo de rotação das imagens.

As últimas funções desta parte do algoritmo do SVA estão apresentadas na Figura 4C. A primeira seção desta figura é responsável por efetuar o corte da imagem rotacionada. O tamanho deste corte dependerá do tamanho das imagens e também da área de sobreposição entre as duas imagens capturadas simultaneamente. A seção seguinte é responsável por efetuar o cálculo do percentual de vegetação presente na imagem carregada inicialmente nesta parte de SVA, que é a imagem limiarizada e filtrada, e na imagem final, que é a rotacionada e recortada. Esses cálculos são para acompanhamento da alteração do percentual da vegetação que ocorre com estes processamentos desta parte do SVA. Para avaliar este passo, foi realizado um teste com 314 imagens e o máximo percentual de diferença

encontrado entre estas duas imagens foi de 3%, indicando pouquíssima alteração das imagens durante essa parte de processamento.

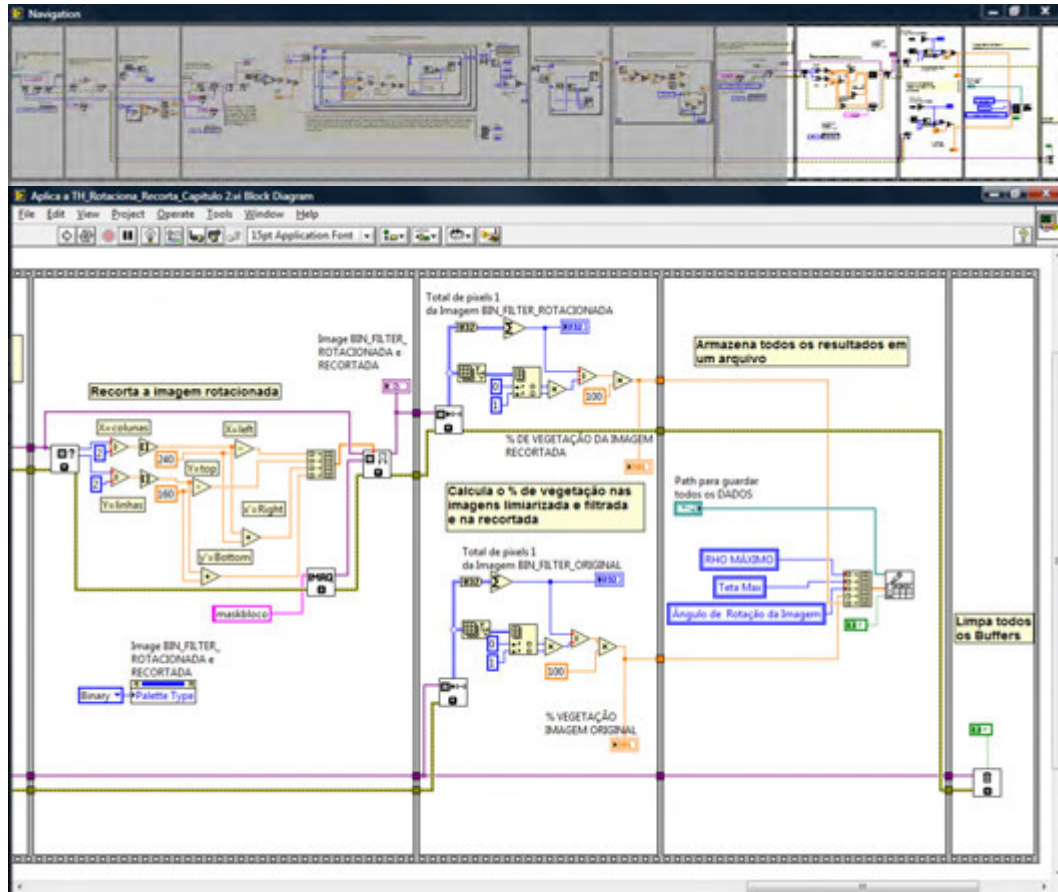


Figura 4C – Diagrama de blocos referente ao recorte das imagens, ao cálculo do percentual de vegetação das imagens originais e recortadas, armazenamento dos dados em arquivo texto e limpeza dos buffers.

Finalizando esta etapa, as duas últimas seções retangulares da Figura 4C apresentam a função que efetua o armazenamento dos dados gerados em um arquivo texto, de forma a manter um histórico dos dados, e a limpeza dos espaços de memórias (buffers). Os dados armazenados são os valores de rho e teta máximos, do ângulo de rotação e dos percentuais das imagens inicial e final desta etapa de processamento.

APÊNDICE D

DIAGRAMA DE BLOCOS DO PROCESSAMENTO DE IMAGENS: SEGMENTAÇÃO DAS LINHAS DE CULTURA E CÁLCULO DO PERCENTUAL DA COBERTURA DE PLANTAS DANINHAS

As Figuras de 1D a 6D apresentam o diagrama de blocos de toda esta etapa final de processamento das imagens do SVA de identificação e segmentação das linhas de cultura e cálculo do percentual da cobertura de plantas daninhas. Sendo que novamente a parte superior sombreada de cada imagem refere-se à visão completa de todo o diagrama de blocos e a parte logo abaixo representa a visão ampliada da área retangular destacada em branco na parte sombreada.

A Figura 1D apresenta as primeiras seções retangulares desta etapa de processamento do SVA, que representam o carregamento, alocação de memória, visualização das imagens a serem processadas, o cálculo da soma de *pixels* com valor binário 1 por coluna na imagem binária, que representa a quantidade de *pixels* referentes as plantas por coluna e que também representa o valor digital 255, representado pela cor branca, e por fim o cálculo da média geral do sinal.

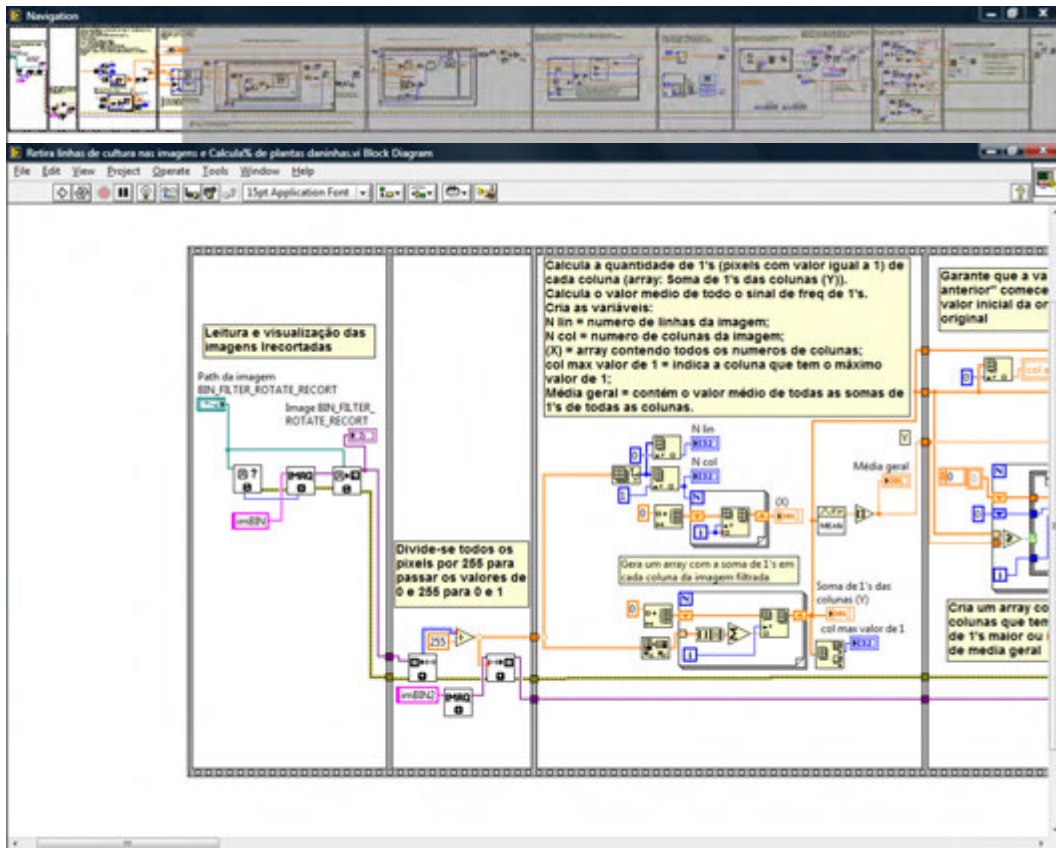


Figura 1D – Diagrama de blocos referente ao carregamento das imagens limiarizadas recortadas no SVA, ao cálculo da soma de *pixels* com valor binário 1 por cada coluna da imagem.

De posse dos valores da soma dos *pixels* de valor binário 1 por cada coluna da imagem foi possível construir uma matriz contendo apenas os números das colunas que possuíam valor de soma superior ou igual ao valor da linha horizontal da média geral do sinal. Estas colunas selecionadas na matriz representam as colunas das linhas de cultura. O diagrama de blocos que efetua este passo pode ser visualizado pela Figura 2D.

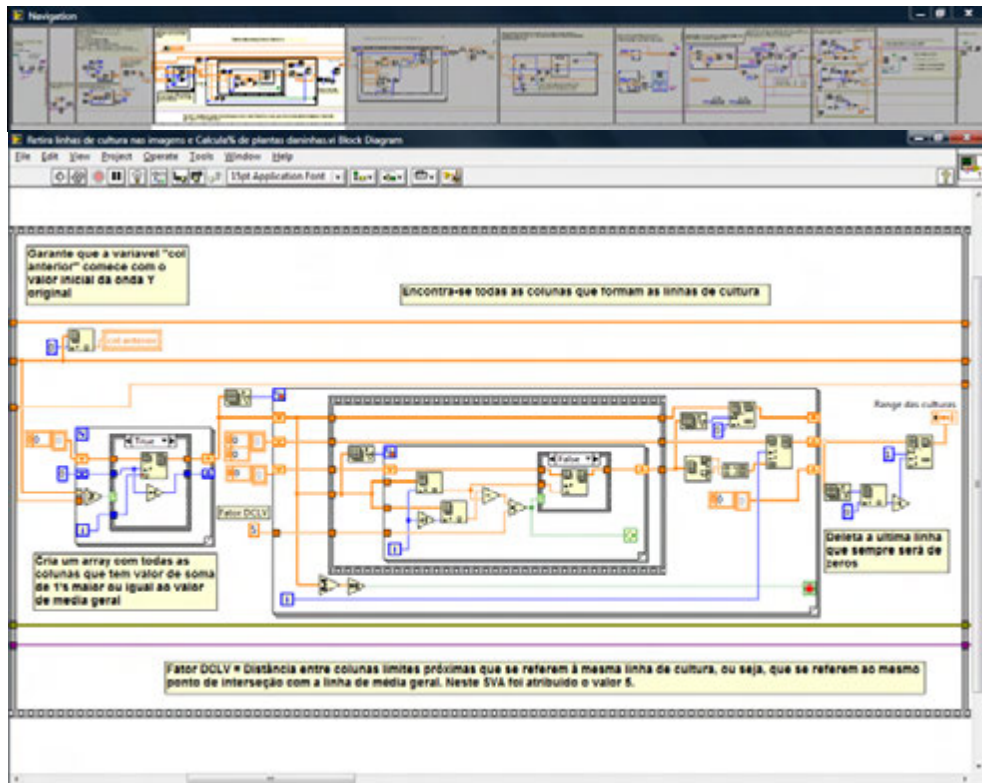


Figura 2D – Diagrama de blocos para encontrar todas as colunas da imagem que representam as linhas de cultura.

Conhecendo todas as colunas que representam as linhas de cultura, a próxima etapa consistiu em segmentá-las e retirá-las da imagem, construindo uma função que identificava os limites das linhas de cultura e a partir daí descobria-se a área ocupada por estas. O algoritmo responsável por encontrar as colunas limites está apresentado na Figura 3D.

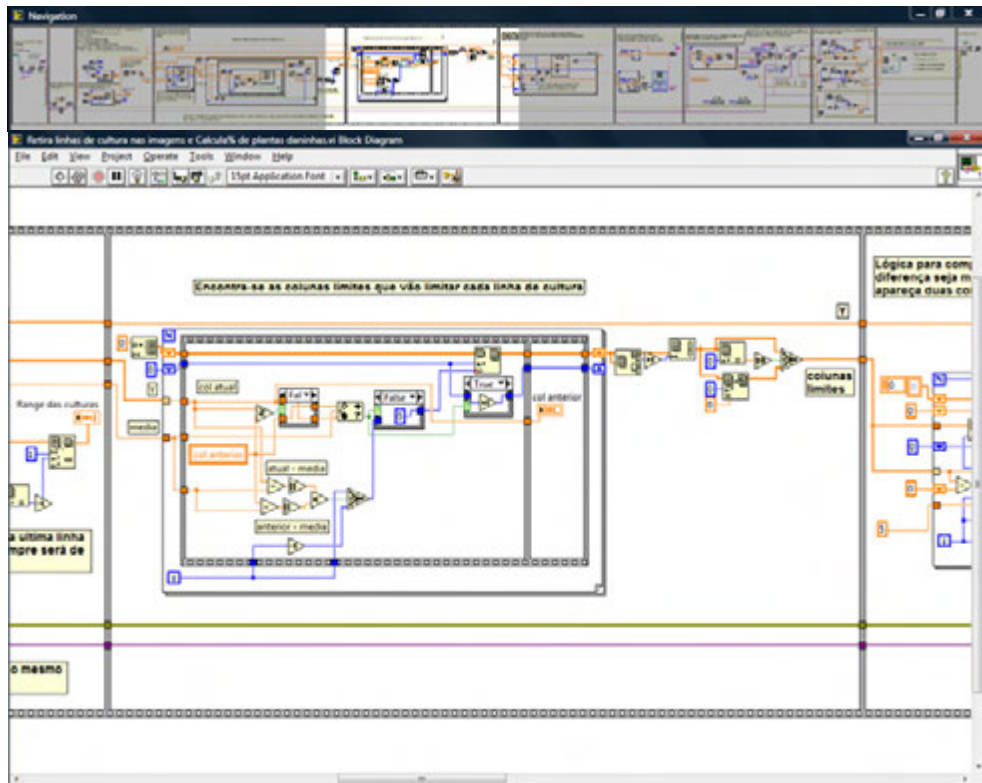


Figura 3D – Diagrama de blocos referente à identificação das colunas limites das linhas de cultura.

Entretanto, pode ocorrer de colunas terem a soma dos valores de *pixels* binário 1 maior que a média geral, mas pertencerem às entrelinhas. Devido a este problema foi construído o diagrama de blocos da primeira seção retangular apresentado pela Figura 4D. Este diagrama utiliza um fator denominado “fator DCLV” que atribui uma faixa de distância entre colunas limites próximas que se referem à mesma linha de cultura, ou seja, que se referem ao mesmo ponto de interseção com a linha de média geral. O valor deste fator vai depender da distância entre as linhas de cultura e do percentual da infestação, pois quanto mais plantas daninhas existem, maior é a dificuldade em encontrar os limites das plantas daninhas.

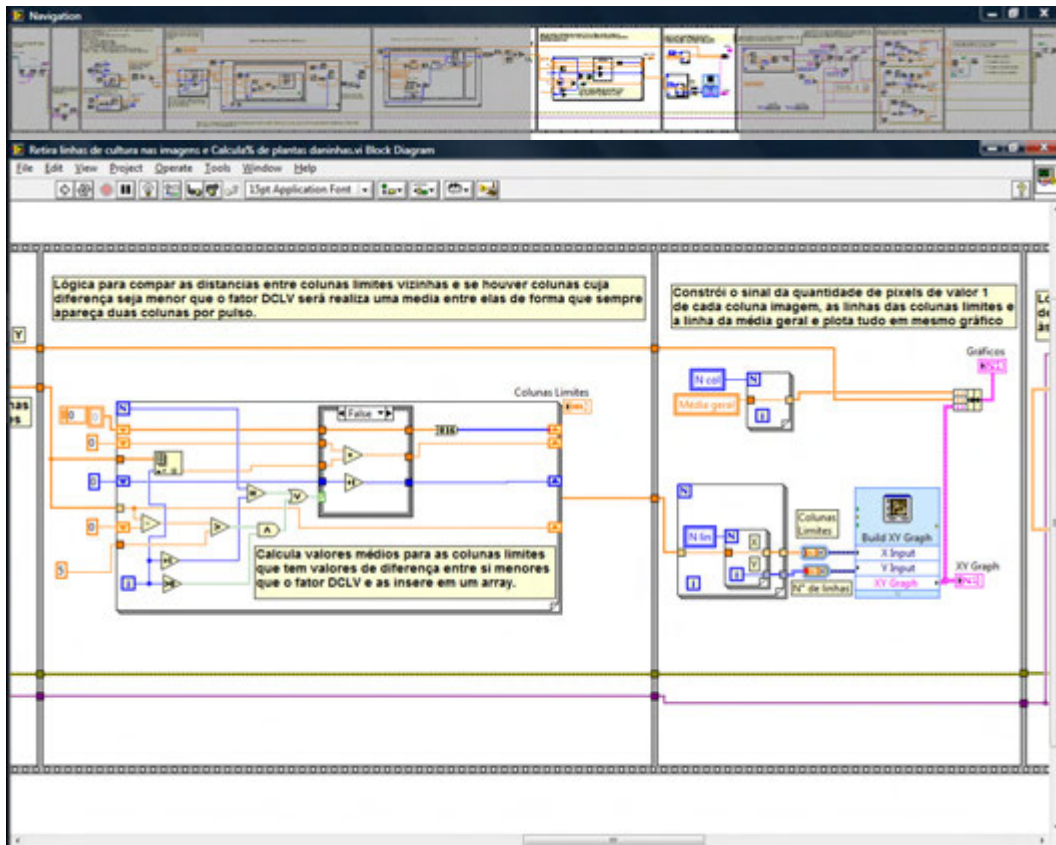


Figura 4D – Diagrama de blocos responsável por definir as colunas limites das linhas de cultura e construir o sinal da soma de *pixels* binário 1, a linha horizontal da média definida e as linhas das colunas limites em um mesmo gráfico.

Após a definição das colunas limites das linhas de cultura o próximo passo, apresentado também pela Figura 4D, consistiu da construção do sinal da frequência de presença de plantas por coluna, que pode ser visualizado na tela do painel de controle da Figura 11 do capítulo 1. Este gráfico contém o sinal que representa a soma de *pixels* de valor binário 1 de cada coluna da imagem, junto com as linhas das colunas limites e a linha horizontal da média de todo o sinal.

Para definir a área das linhas de cultura, já que seus limites são conhecidos, foi desenvolvida uma lógica para definir retângulos que envolvem todas as linhas de cultura. As posições destes retângulos foram encontradas pelos limites das linhas de cultura calculados anteriormente. Estes retângulos são transformados em descritores de regiões de interesse (ROI's), em seguida

estes descritores são agrupados e transformados em máscaras que serão aplicadas na imagem para retirar as linhas de cultura. O diagrama de blocos desta lógica está apresentado na primeira seção da Figura 5D.

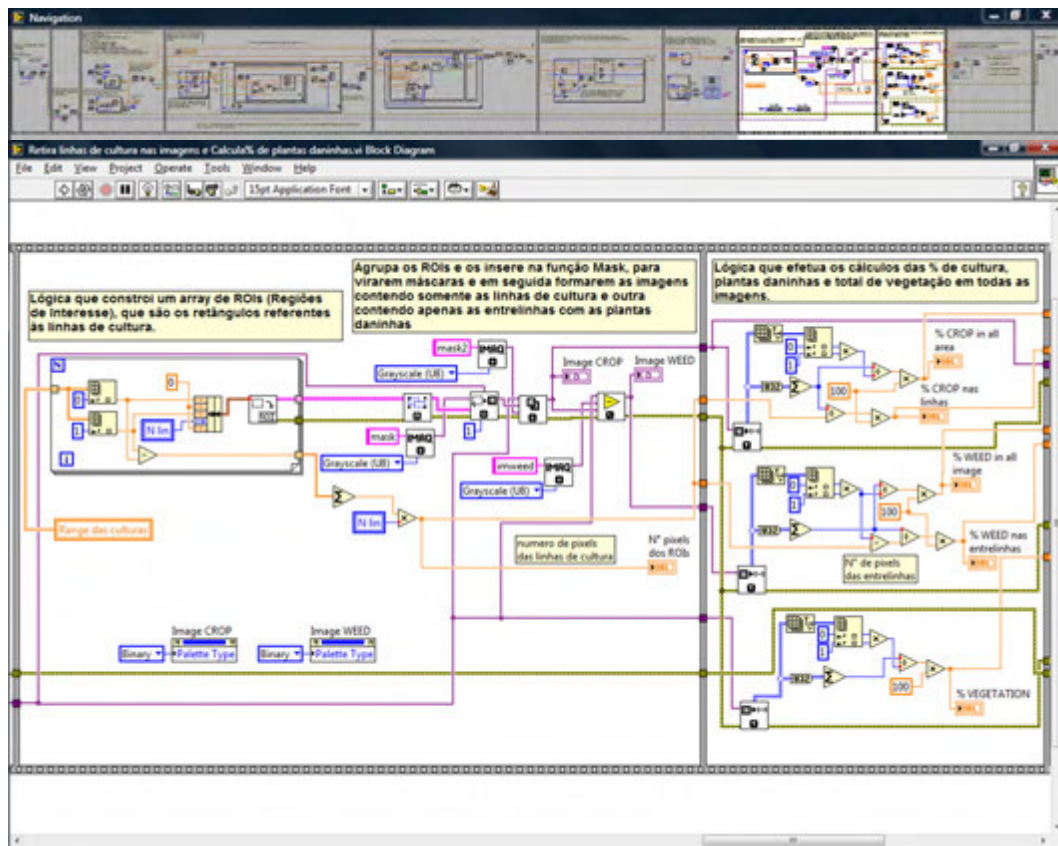


Figura 5D – Diagrama de blocos da construção das máscaras para retirar as linhas de cultura e do cálculo do percentual da cobertura de plantas daninhas.

Depois de encontradas as linhas de culturas estas foram retiradas da imagem e o percentual da cobertura de plantas presente era referente somente as plantas daninhas. As linhas retiradas foram copiadas para outra imagem e com isso foi possível calcular também o percentual de cobertura referente à cultura. O diagrama de blocos dos cálculos dos percentuais das coberturas de plantas daninhas e da cultura está presente na última seção da Figura 5D.

A Figura 6D apresenta os últimos passos que finalizam toda a etapa de processamento de imagens e construção do SVA. No primeiro passo os dados

dos percentuais de cobertura são armazenados em um arquivo texto e em seguida ocorre a limpeza dos espaços de memórias, verificação e visualização de erros que podem acontecer ao longo de todo o processamento.

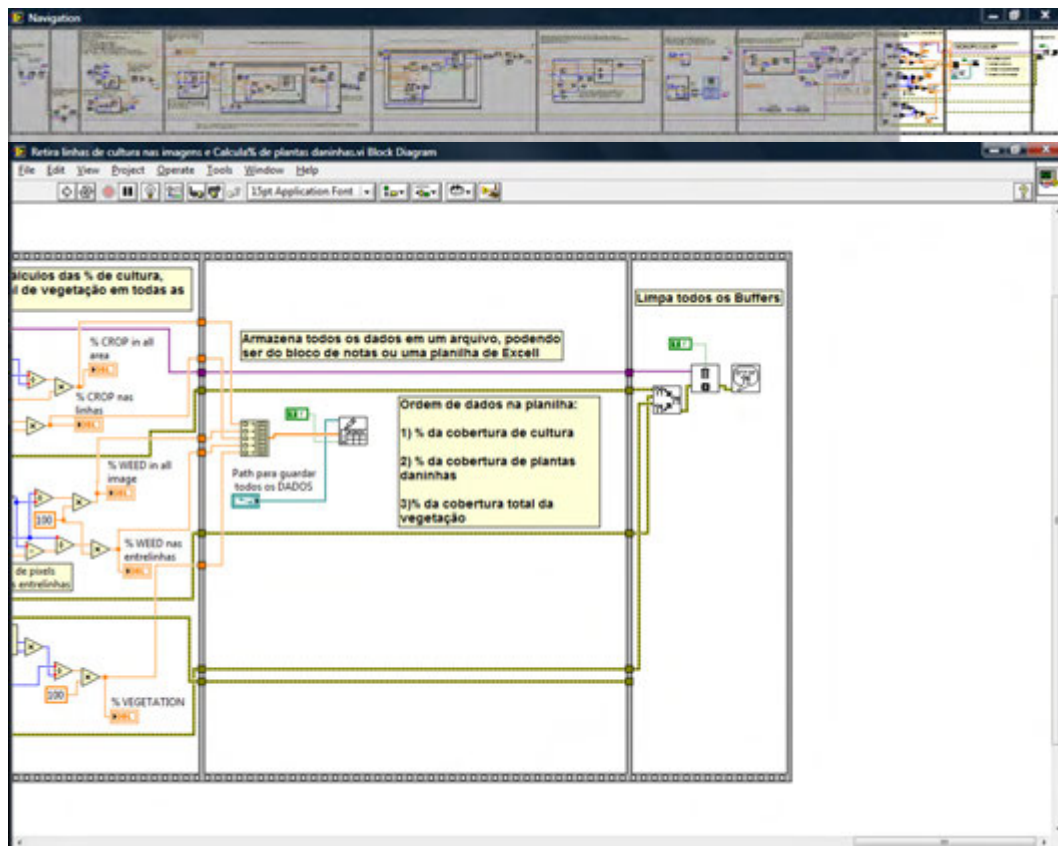


Figura 6D – Diagrama de blocos do armazenamento dos valores dos percentuais de cobertura em arquivo texto e limpeza dos espaços de memórias (buffers).