

DIOGO SANTOS CAMPOS

**ANÁLISE DA VARIABILIDADE ESPACIAL DA PRODUTIVIDADE NA
CAFEICULTURA DE MONTANHA COM USO DE TÉCNICAS DE
SENSORIAMENTO REMOTO**

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

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2005

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

T

C198a
2005

Campos, Diogo Santos, 1978-

Análise da variabilidade espacial da produtividade da cafeicultura de montanha com uso de técnicas de sensoriamento remoto. – Viçosa : UFV, 2005.
xi, 50f. : il. ; 29cm.

Inclui apêndice.

Orientador: Daniel Marçal de Queiroz.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f. 36-40

1. Café - Sensoriamento remoto. 2. Café - Produção.
3. Produtividade agrícola. 4. Processamento de imagens - Técnicas digitais. 5. Agricultura de precisão. I. Universidade Federal de Viçosa. II. Título.

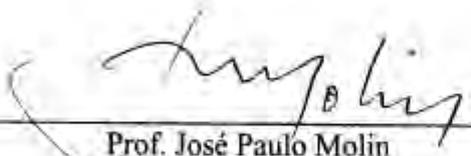
CDD 22.ed. 631.3

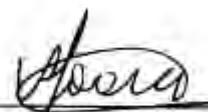
DIOGO SANTOS CAMPOS

**ANÁLISE DA VARIABILIDADE ESPACIAL DA PRODUTIVIDADE NA
CAFEICULTURA DE MONTANHA COM USO DE TÉCNICAS DE
SENSORIAMENTO REMOTO**

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

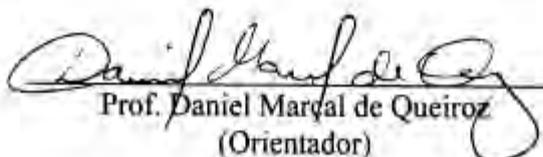
APROVADA: 15 de fevereiro de 2005.


Prof. José Paulo Molin


Prof. Vicente Paulo Soares


Prof. Francisco de Assis de Carvalho Pinto
(Conselheiro)


Prof. Nerilson Terra Santos
(Conselheiro)


Prof. Daniel Marçal de Queiroz
(Orientador)

“Será que não nos atrevemos porque as coisas são difíceis ou será que são difíceis porque não nos atrevemos?”

Lucius Annaeus Seneca
Filósofo e político romano
(4 AC – 65 DC)

A meus queridos pais Aloísio e Iara,
pelo carinho, confiança e investimento;

e irmãos Suzana e Lucas,
pelo apoio e amizade.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela vida e paz.

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

Aos proprietários e funcionários da Fazenda Braúna, por viabilizarem o desenvolvimento desta pesquisa. À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), pelo apoio financeiro ao projeto de pesquisa. Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – Brasil (CNPq), pelo bolsa concedida durante o Curso de Mestrado.

Ao professor Daniel Marçal de Queiroz, pela orientação, dedicação, amizade e confiança.

Ao professor Francisco de Assis de Carvalho Pinto, pela orientação, dedicação, amizade, paciência e confiança.

Ao professor Nerilson Terra Santos, pela colaboração e sugestões no decorrer do trabalho.

Aos professores do Departamento de Engenharia Agrícola.

Aos funcionários do Laboratório de Mecanização Agrícola e do Departamento de Engenharia Agrícola.

Aos colegas do Laboratório de Projeto de Máquinas e Visão Artificial, Jorge, Natanael, Murilo, José Marcelo, Enrique, Darly, Elton, Mário, Arturo, Jean, Alisson, Cristiano, Kalil, Varella e aos estagiários Rodrigo, Igor, Arlindo, Hugo, Adenilson, Alexandre e Eduardo e aos colegas de curso Léo, Denílson, Gilton, Luizinho, Andréia, Fabiane, Gerson, Arlindo e Renato, pelo apoio, amizade e convivência.

Ao amigo Dawson, pela amizade, confiança, paciência e companheirismo.

A meus pais e irmãos, pelo apoio constante.

A todos que contribuíram e possibilitaram a realização deste trabalho.

BIOGRAFIA

DIOGO SANTOS CAMPOS, filho de Aloísio Torres de Campos e Iara Botelho Santos Campos, nasceu no dia primeiro de janeiro de 1978, em Lavras, M.G.

Em janeiro de 2003, concluiu o curso de Engenharia Agrícola na Universidade Federal de Lavras.

Em março de 2003, iniciou o Curso de Mestrado em Engenharia Agrícola, área de concentração em Mecanização Agrícola, na Universidade Federal de Viçosa.

Em fevereiro de 2005, submeteu-se à defesa de tese.

ÍNDICE

RESUMO.....	viii
ABSTRACT.....	x
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	4
2.1. Fatores que afetam a produtividade do cafeeiro	4
2.2. Mapeamento da produtividade na agricultura de precisão	6
2.3. Sensoriamento remoto	8
2.3.1. Características dos alvos espectrais	8
2.3.2. Sensoriamento remoto na identificação da variabilidade da produtividade	9
3. MATERIAL E MÉTODOS	13
3.1. Aquisição das imagens aéreas	16
3.2. Processamento das imagens aéreas.....	18
3.3. Análise das imagens aéreas.....	20
3.3.1. Seleção dos índices que melhor detectaram a variabilidade espacial da produtividade	20
3.3.2. Estudo da produtividade em função de índices	21
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	22
4.1. Processamento das imagens aéreas.....	24
4.2. Análise das imagens aéreas.....	26
5. RESUMO E CONCLUSÕES	35
6. LITERATURA CITADA.....	36

APÊNDICES	41
Apêndice A	
Valores médios calculados da massa (kg) de café verde, cereja, passa seco e impurezas de cada sub-área	42
Apêndice B	
Valores máximos, mínimos, desvios padrões e médios calculados de umidade (%) de café verde, cereja e passa seco de cada sub-área.....	43
Apêndice C	
Valores de percentagens dos estádios de maturação de cada sub-área.....	44
Apêndice D	
Valores médios calculados das imagens-índices (Vdn, Vmn, IVn, RVm, RVd, NDVI, GNDVI e SAVI) das 18 subáreas com uso do software MATLAB para as imagens aéreas do dia nove de setembro de 2003.....	45
Apêndice E	
Valores médios calculados das imagens-índices (Vdn, Vmn, IVn, RVm, RVd, NDVI, GNDVI e SAVI) das 18 subáreas com uso do software MATLAB para as imagens aéreas do dia 27 de novembro de 2003	46
Apêndice F	
Código-fonte da rotina implementada no MATLAB, para processamento das subáreas resultantes dos recortes das imagens falsa cor utilizando os índices banda verde normalizada, banda vermelho normalizada, banda infravermelho normalizada, razão de vermelho e infravermelho, razão de verde e infravermelho, índice de vegetação da diferença normalizado, índice de vegetação da diferença de verde normalizado e índice de vegetação ajustador do solo.....	47
Apêndice G	
Código-fonte da rotina implementada no MATLAB, para processamento das imagens utilizando o índice banda verde normalizado na geração de mapas de tendência de produtividade	48

RESUMO

CAMPOS, Diogo Santos, M.S., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2005. **Análise da variabilidade espacial da produtividade na cafeicultura de montanha com uso de técnicas de sensoriamento remoto.** Orientador: Daniel Marçal de Queiroz. Conselheiros: Francisco de Assis de Carvalho Pinto e Nerilson Terra Santos.

A adoção da agricultura de precisão tem, como ponto de partida, uma linha de procedimentos, que geralmente começam com a elaboração de um mapa de produtividade durante a colheita. Para a cultura de alguns grãos, como o milho e a soja, já existem dispositivos disponíveis no mercado, que acoplados às colhedoras combinadas, geram esses mapas de produtividade. No caso de culturas perenes, os sistemas de mapeamento de produtividade estão menos desenvolvidos devido à menor utilização da colheita mecanizada. Grande parte da colheita do café no Brasil é, ainda, feita manualmente. Nas áreas de produção de café de montanha, como é o caso da Zona da Mata, é difícil obter o mapeamento da produtividade uma vez que não se utilizam colhedoras automotrizes. Assim para o mapeamento da variabilidade da produtividade do café de montanha, há necessidade da geração de tecnologias específicas. O objetivo principal deste trabalho foi estudar a variabilidade espacial da produtividade na cafeicultura de montanha, por meio de técnicas de sensoriamento remoto. Foram selecionadas seis áreas para implantação das parcelas experimentais, sendo que, dentro de cada área, as plantas possuíam mesma idade, variedade e espaçamento. Três subáreas foram instaladas no campo, dentro de cada área, por meio de estacas de madeira georreferenciadas com uso de um GPS diferencial Trimble Pro XRS. Foi obtida a produtividade corrigida para a umidade padrão de 12% de cada subárea. As imagens aéreas foram obtidas a 2.000 metros de altura, nos dias nove de setembro e 27 de novembro de 2003. Identificadas nas imagens georreferenciadas, as subáreas foram recortadas e processadas, usando-se os índices espectrais Vdn, Vmn, IVn, RVm, RVd, NDVI, GNDVI e SAVI. Para efeito de análises estatísticas, foi utilizado um delineamento inteiramente casualizado, em que as diferentes áreas foram consideradas como um fator primário

designado às parcelas e as diferentes avaliações mensais (épocas de tomadas de imagens) como sendo um fator secundário designado às subparcelas, caracterizando, assim, um experimento em parcelas subdivididas no tempo. Foram realizadas análises de variância para cada índice espectral, nas diferentes épocas de tomada de imagens. Selecionaram-se os índices, que resultaram em teste F não-significativo para interação e significativo para área e época. Para cada uma das duas épocas, foram ajustados modelos lineares de regressão de primeiro e segundo grau da produtividade, pelo método dos mínimos quadrados, em função dos valores do índice selecionado. O modelo selecionado foi de segundo grau referente ao índice banda verde normalizada (Vdn) para o conjunto de imagens obtidas no dia nove de setembro de 2003, que apresentou significância de 7,91% na análise de variância da regressão. O modelo e as imagens, adquiridas no dia nove de setembro de 2003, foram utilizados na geração de mapas de produtividade estimada com uso do programa MATLAB. Nas condições em que o trabalho foi realizado, concluiu-se que, entre os índices espectrais avaliados, apenas o índice Vdn em imagens aéreas falsa-cor satisfaz os critérios estabelecidos para seleção de índices. Imagens aéreas falsa-cor, obtidas logo após a colheita da safra anterior, produziram um modelo de regressão com melhor ajuste para estabelecer a relação funcional entre produtividade e índice espectral Vdn. A discriminação da variabilidade espacial da produtividade a partir de índices espectrais obtidos a partir de imagens aéreas falsa-cor é possível, mas ajustes são necessários.

ABSTRACT

CAMPOS, Diogo Santos, M.S., Universidade Federal de Viçosa, february of 2005. **Spatial variability analysis of coffee yield using remote sensing techniques.** Adviser: Daniel Marçal de Queiroz. Committee members: Francisco de Assis de Carvalho Pinto and Nerilson Terra Santos.

The precision farming technique is composed by a set of management practices that generally starts by the elaboration of a yield map. For some crops, such as corn, soybeans, wheat, cotton, yield monitors that generate yield maps are commercially available. For perennial crops, the systems for yield mapping are less developed, due to the complexity of the harvesting systems. Great part of the coffee harvesting in Brazil is still made manually. In the mountain areas that produce coffee, such as Zona da Mata Mineira, the development of yield monitor is even more difficult and there is a lack of technology for these areas. The objective of this work was to study the coffee yield variability in mountain areas using remote sensing. Six areas were chosen for doing the experimental work, in each area the plants had same age, variety and density. Three sub-areas were delimited in each area by using a DGPS Trimble Pro-XRS. The yield in each sub-area was corrected to 12% of moisture wet basis. The aerial images had been taken at the 2000 meters of height on September, 9 and on November, 27 of 2003. After identifying the sub-areas in the georeferenced images, then they were isolated and processed with use of Vdn, Vmn, IVn, RVm, RVd, NDVI, GNDVI and SAVI spectral indices. For doing the statistical analyses, the statistical model of a randomized completely design was used, where the different areas had been considered as the primary factor assigned to the plots and the different monthly evaluations (times of taking of images) as being the secondary factor assigned to the subplots, thus characterizing an split-plot experiment on time. Analyses of variance for each spectral index at the different times of taking of images had been carried out. For each one of the two images, linear models of regression of first and second degree had been adjusted, by using the least square method, relating the yield as a function of the values of the selected index. The best model was the

second degree polynomial of the normalized green band index (Vdn) for the set of images taken on September, 9th of 2003 which showed significance at 7.91% level. Therefore, the model and the images acquired in September, 9th of 2003 were used for generating the yield maps. In the conditions where the work was carried out it was concluded that among the evaluated spectral indices, only the Vdn index in aerial images false-color satisfied the established criteria for selection of indices. Aerial false-color images taken just after the harvesting of the previous season produced a model of regression with better adjustment to establish the functional relationship between yield and the Vdn spectral index. The discrimination of the spatial variability of the yield from spectral indices obtained from aerial false-color images is possible, however adjustments are necessary.

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, tem aumentado o interesse de produtores por técnicas de manejo a sítio específico das culturas agrícolas. A motivação para adoção dessas práticas localizadas é devida ao potencial de aumento dos lucros e à maior eficiência no uso dos insumos agrícolas que as mesmas apresentam. Desta maneira, os produtores vislumbram uma possível solução para uma agricultura sustentável com produção de alimentos a custos competitivos e baixa agressão ao meio ambiente.

Perdendo apenas para o mercado de petróleo, o café é o segundo maior gerador de divisas do mundo, atingindo anualmente de 12 a 13 bilhões de dólares com exportação de cerca de 60 milhões de sacas. O Brasil é o maior produtor, maior exportador e o segundo país consumidor de café mundial. Nos últimos 35 anos, obteve uma produção média anual de 24,3 milhões de sacas de 60 kg de café beneficiado. Esta atividade gera, aproximadamente, 10 milhões de empregos diretos e indiretos. Dos cafeicultores brasileiros, 70% são classificados como pequenos produtores, possuindo no máximo 20 hectares de área de café. Este grupo detém apenas cerca de 30% do parque cafeeiro nacional. Minas Gerais é o maior estado produtor, contribuindo com 50% da produção brasileira, aproximadamente (GUIMARÃES *et al.*, 2002).

A agricultura de precisão agrega técnicas, que permitem acessar e monitorar a atividade agrícola em um nível local, cujo objetivo é aumentar a eficiência com base no manejo diferenciado de áreas na agricultura (QUEIROZ *et al.*, 2000). A adoção da agricultura de precisão tem como ponto de partida, uma linha de procedimentos que, geralmente, começa com a elaboração de um mapa de produtividade durante a colheita. A produtividade é influenciada por vários fatores, tais como a utilização de insumos, preços, avanços técnicos, fatores biológicos e climáticos (CAMARGO *et al.*, 2003).

Para a cultura de alguns grãos, como o milho e a soja, já existem sistemas comercializados que, acoplados às colhedoras combinadas, geram esses mapas de produtividade. No caso das culturas perenes, os sistemas de mapeamento de produtividade estão menos desenvolvidos, devido à menor utilização da colheita mecanizada (EMMOTT *et*

al., 1997). Os mapas de produtividade são excelentes fontes de informação e diagnóstico das condições de produção encontradas no campo. Fotografias aéreas, imagens de satélite e outros recursos têm sido testados como ferramentas, para identificar manchas existentes em um talhão (MOLIN, 2000). Identificada a variabilidade, buscam-se, então, suas causas e a viabilidade do manejo localizado das mesmas.

No Brasil, a adoção de técnicas de agricultura de precisão vem ocorrendo de forma gradual, em que se busca a adaptação às condições brasileiras e maior estudo referente aos fatores de produção envolvidos. Para a cultura do café, alguns estudos vêm sendo realizados na geração de mapas de produtividade. LEAL (2002) desenvolveu um sistema de mapeamento da produtividade na colheita mecanizada do café, usando uma colhedora automotriz, em que se verificou a existência de variabilidade. OLIVEIRA (2003) estudou, por meio de amostragem, a variabilidade espacial da produção do café de montanha, georreferenciando as medidas de 60 litros antes que fossem retiradas do campo. A metodologia utilizada permitiu mapear a variabilidade da produtividade, porém, em alguns pontos, a produtividade foi irreal devido à dificuldade da definição da área de influência de cada amostra colhida. Em ambos os trabalhos, foi constatada a variabilidade espacial da produtividade, fortalecendo o potencial do conceito de agricultura de precisão para o gerenciamento localizado da cultura do café.

No Brasil, apesar da tendência do aumento da mecanização na colheita de café, esta é ainda feita manualmente, em sua maioria. Nas áreas de produção de café de montanha, como é o caso da Zona da Mata, o mapeamento da variabilidade da produtividade é mais difícil de ser realizado, uma vez que não se usam colhedoras automotrizes. A metodologia por meio de amostragem mostrou-se, segundo OLIVEIRA (2003), trabalhosa e de difícil definição da área de influência de cada amostra.

Portanto, para mapeamento da variabilidade da produtividade do café de montanha, há necessidade da geração de tecnologias específicas. Uma possível solução seria o uso de sensoriamento remoto que, por definição, é o conjunto de técnicas destinado à obtenção de informação sobre objetos, sem que haja contato físico com eles. Esta técnica permite a obtenção não-destrutiva de dados de extensas áreas em curto espaço de tempo. Devido ao grande número de sensores comerciais disponíveis, o custo vem sendo reduzido e, conseqüentemente, seu uso é viabilizado. Atualmente, há disponibilidade de imagens orbitais de alta resolução como, por exemplo, imagens dos sensores Ikonos com resolução espacial de um a quatro metros e Quickbird com resolução espacial entre 0,6 e 2,9 metros.

Há o potencial para estimativa da produtividade por meio de sensoriamento remoto ainda durante o ciclo da cultura, o que pode permitir a implementação de ações corretivas ou verificação das causas da variabilidade com a cultura ainda implantada (SEIELSTAD, 1996). Mesmo para as culturas anuais, em que os sensores de colheita já estão bastante avançados, diversos autores como KOLLER *et al.* (1999) para tomate, YANG *et al.* (1999) para sorgo, WOOTEN *et al.* (1999) para algodão e GOPALAPILLAI e TIAN (1999) para milho, ressaltam a importância do sensoriamento remoto para a agricultura de precisão. O sensoriamento remoto desponta, segundo Joaquim (1998), citado por DAAMEN *et al.* (2002), como uma das ferramentas mais viáveis para mapear a variabilidade da produtividade e auxiliar o processo de estimativa de produção, possibilitando, por meio de processamento digital, gerar mapas que indiquem a variabilidade espacial da cultura. Para a cultura do café, o sensoriamento remoto tem sido usado, principalmente, no mapeamento e caracterização de áreas produtivas.

Para a adoção dos conceitos e técnicas de agricultura de precisão, um dos primeiros procedimentos é a obtenção dos mapas de produtividade. A identificação da variabilidade espacial da produtividade, na cafeicultura de montanha, com uso de sensoriamento remoto pode ser uma solução para que pequenos e médios produtores acessem e monitorem a atividade agrícola em nível local. Desta modo, estes produtores podem aumentar a eficiência e os lucros com base no manejo diferenciado das áreas na cafeicultura.

Portanto, o objetivo principal do presente trabalho foi estudar a variabilidade espacial da produtividade na cafeicultura de montanha, por meio da aplicação de técnicas de sensoriamento remoto. Os objetivos específicos foram:

- Identificar a época mais adequada para obtenção de imagens aéreas, para fins de estimativa da variabilidade da produtividade; e
- Desenvolver técnicas de processamento e análise de imagens aéreas digitais, visando à estimativa da variabilidade da produtividade.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Fatores que afetam a produtividade do cafeeiro

O café é uma importante fonte de renda para a economia brasileira, em razão de sua participação na receita cambial, transferência de renda aos outros setores da economia e contribuição à formação de capital no setor agrícola do país, além da expressiva capacidade de absorção de mão-de-obra. De acordo com CONAB (2004), a produtividade para o Estado de Minas Gerais na safra 2003/2004 foi de 12,33 sacas por hectare, enquanto para a Zona da Mata e Jequitinhonha foi de 11,21 sacas por hectare, ficando, portanto, abaixo da média de Minas Gerais.

A produção da cultura do cafeeiro é o resultado integrado dos diversos fatores intervenientes do manejo da cultura, do solo, clima e da própria planta. Pouco tem sido relatado sobre a variabilidade da produção no tempo e espaço, em áreas com cafeeiro consideradas homogêneas (WEILL *et al.*, 2000). O clima exerce um certo controle na produtividade devido à sua influência em determinados períodos críticos da cultura, como o florescimento ou formação de frutos (CAMARGO *et al.*, 2003). Segundo MAGALHÃES (2002), a perda de área foliar de cafeeiros pode ocorrer motivada por diversos fatores bioecológicos, tais como ataques de plantas e moléstias, falta de água no solo, danos provocados por implementos agrícolas etc.

RENA *et al.* (2003) afirmam que o adensamento proporciona maiores produtividades que os plantios convencionais e há várias evidências de que a população ideal está em torno de 6.000 plantas por hectare. Em um experimento com café nas condições do Cerrado de Patrocínio, região do Alto Paranaíba em Minas Gerais, os autores concluíram que as diferenças de intensidade de floração entre os espaçamentos na rua foram, positivamente, correlacionadas e associadas à produção do ano anterior. A fase de chumbinho e o crescimento da floração principal apresentaram grande atraso no maior espaçamento na rua, em decorrência do esgotamento proveniente da maior produção por planta na safra

anterior. A produção cresceu, linearmente, por planta em função de maiores espaçamentos de rua e na fileira e decresceu com a idade da lavoura.

RENA *et al.* (1996) relatam que, em experimento realizado em Patrocínio, em 1988, a floração foi negativamente correlacionada com a produção por planta do ano anterior, nos espaçamentos maiores (3,00 m x 1,50 m). Nesses casos, a floração principal foi retardada em cerca de 30 dias, ainda que o início da floração não tenha sido influenciado pelo espaçamento mais amplo, ou pela carga do ano anterior. Os autores citam que para obter produtividade sustentada, há necessidade de se alcançar rapidamente o “índice de área foliar ótimo” após o plantio, ou após a poda, buscando sempre manter a razão folha fruto em torno de 200 mm².

Segundo Alegre (1959), citado por DAMATTA e RENA (2002), para *Coffea arabica* L., as zonas mais adequadas de produção devem ter temperaturas médias anuais entre 18 e 21°C, sem grandes variações sazonais. Temperaturas relativamente elevadas, na época de floração, reduzem o vingamento das floradas e podem provocar impactos negativos diretos sobre a produção, em especial nos anos em que a estação seca é prolongada (Camargo, 1985 citado por DAMATTA e RENA, 2002). O lento desenvolvimento dos frutos resulta em uma maturação tardia, que pode sobrepor-se ou ultrapassar a florada seguinte, com efeitos negativos sobre a produção em função dos danos causados nos botões florais durante a colheita.

No Brasil, a colheita do café geralmente é realizada de uma só vez por derriça. O conhecimento desta prática associada a fatores ambientais é importante para o planejamento das adubações e da colheita, contribuindo, assim, para o aumento da produtividade e qualidade do produto final (GUIMARÃES *et al.*, 2002). Uma vez encerrada a operação de colheita dos frutos, os cafeicultores devem, necessariamente, preocupar-se com a condição das plantas, visando a preservação do potencial vegetativo e produtivo das lavouras para o próximo ano (SOUZA, 2002).

O cafeeiro começa a florescer no segundo ano após o plantio e atinge o máximo de floração entre o quinto e oitavo ano de produção, com várias floradas por ano. O cafeeiro apresenta floração gregária, uma característica em que todas as plantas em uma certa extensão geográfica florescem simultaneamente. Em *Coffea arabica* L., as inflorescências são formadas nas axilas das folhas opostas e decursadas dos ramos laterais crescidos na estação anterior, pois os nós produzem flores apenas uma vez. Isto faz com que o crescimento de ramos seja uma das características a serem utilizadas para a previsão de safra do ano seguinte, ou seja, quanto maior o crescimento dos ramos laterais, maior será o potencial produtivo do ano

seguinte. Em *Coffea canephora*, entretanto, as inflorescências são produzidas apenas no corrente ano (GUIMARÃES *et al.*, 2002).

Desde a floração até a fase de chumbinho, o crescimento do fruto é muito lento. Depois, cresce rapidamente até atingir a fase de “fruto verde”. Segue-se um período de paralisação do crescimento (formação e endurecimento do endosperma), até o início da maturação, quando o fruto aumenta rapidamente de tamanho (GUIMARÃES *et al.*, 2002).

Segundo PICINI (1998), a produtividade do ano anterior deve ser considerada em modelos agrometeorológicos de estimativa e previsão de safra, aplicados para o cafeeiro, pois, o ciclo bienal interfere no efeito das condições meteorológicas. Os coeficientes relativos à produtividade do ano anterior têm grande influência na produtividade, na maioria das combinações.

2.2. Mapeamento da produtividade na agricultura de precisão

O desenvolvimento da agricultura de precisão vem proporcionando avanços concernentes ao aproveitamento do potencial produtivo das lavouras, possibilitando a colocação de fertilizantes, sementes e produtos agroquímicos de acordo com as necessidades de cada local, afim de otimizar o uso desses insumos e reduzir o impacto ambiental. O entendimento sobre a relação funcional entre a produtividade e outros fatores espaciais torna-se uma necessidade básica para o avanço da agricultura de precisão que, segundo SEELAN *et al.* (2003), é econômica e ecologicamente promissora e será um dia o modelo padrão a ser adotado.

Os mapas georreferenciados, incluindo as propriedades do solo, são muito usados para determinar em que escala se relaciona à produtividade com os níveis de nutrientes. Estes mapas são utilizados na tecnologia de aplicação a taxas variáveis, sendo que o Sistema de Posicionamento Global (GPS) constitui uma importante ferramenta no uso desta tecnologia. O GPS é um sistema de navegação, que compreende uma rede de satélites colocados em órbita pelo Departamento de Defesa dos EUA. O GPS foi originalmente concebido para fins militares, mas na década de 1980 o governo americano disponibilizou o sistema para uso civil. O GPS funciona em qualquer condição de tempo, em qualquer lugar do mundo, durante 24 horas por dia. Não existem taxas de assinatura ou algum tipo de pagamento para uso do sistema, que se tornou totalmente operacional no ano de 1995 (QUEIROZ *et al.* DIAS, 1998).

A agricultura de precisão proporciona um vasto conjunto de ferramentas para análise e interpretação das informações, enquanto sua correta utilização propicia melhorias no monitoramento da variabilidade da produtividade. A maioria dos trabalhos disponíveis sobre agricultura de precisão têm sido desenvolvidos para culturas anuais (BALASTREIRE *et al.*, 2002). O avançado estágio tecnológico das colhedoras automotrizes facilitou a introdução de uma série de sensores e controladores que, associados ao GPS, permite o mapeamento da produtividade com poucas intervenções do operador. LARSCHEID *et al.* (1997) recomendam a combinação de três ou quatro mapas de produtividade da área para os fatores espaciais e temporais limitantes da produtividade sejam distinguidos. A partir da geração de mapas de produtividade é possível constatar a variabilidade espacial de produção, em que se evidencia a homogeneidade da área (CREMONINI & MOLIN, 2002).

No caso de culturas perenes, os sistemas de mapeamento de produtividade estão menos desenvolvidos, devido à menor utilização da colheita mecanizada (EMMOTT *et al.*, 1997). Por outro lado, são produtos de elevado valor comercial, pois, empregam altas doses de fertilizantes e defensivos, aumentando, assim, a possibilidade de viabilização econômica da agricultura de precisão. Segundo SCHIEBELBEIN *et al.* (2004), em um experimento realizado no Segundo Planalto Paranaense, no município de Carambei, com sistema de plantio direto e rotação de culturas, o mapeamento dos atributos do solo associados ao mapeamento da produtividade mostrou-se fundamental para determinação dos fatores limitantes. O incremento da produtividade é o resultado de um conjunto de medidas, não sendo, portanto, suficiente determinar a causa dos problemas se suas correções não forem realizadas de forma adequada.

Utilizando colhedoras automotrizes para mapear a produtividade do cafeeiro, SARTORI *et al.* (2001), concluíram que a utilização de um único fator de correção na obtenção de café em coco a partir do café de campo é problemática, devido à variabilidade espacial na cafeicultura.

Segundo CAPPELLI (2004), o sensoriamento remoto, através de imagens obtidas por satélites, apesar de já possuir precisão razoável para uma parte das necessidades da agricultura de precisão, ainda é deficientes, relativamente ao tempo transcorrido entre a passagem do satélite e o resultado interpretado da imagem. A identificação de áreas com desenvolvimento inadequado da cultura, através de imagens obtidas com fotografias aéreas do campo de produção, pode possibilitar, após verificação local das causas, uma correção em tempo para que a queda de produtividade seja minimizada.

2.3. Sensoriamento remoto

Sensoriamento remoto é o conjunto de técnicas destinado à obtenção de informação sobre objetos, sem que haja contato físico com eles. A aquisição de dados em sistemas de sensoriamento remoto registra, em selecionadas faixas de comprimento de onda, a quantidade de energia refletida ou emitida por objetos na superfície terrestre. Um ingrediente básico e essencial na análise e interpretação de dados de sensores remotos estão voltados para as características espectrais dos vários tipos de vegetação, solo, água, e outras características da superfície terrestre.

2.3.1. Características dos alvos espectrais

Segundo HOFFER (1978), a reflectância espectral de vegetação verde é distinta e bastante variável com o comprimento de onda. Nos comprimentos de onda do visível, a pigmentação, em especial a clorofila, domina a resposta espectral de plantas. A reflectância nas folhas verdes apresenta-se muito baixa, nos comprimentos de onda do azul e do vermelho. Uma falta relativa de absorção nos comprimentos de onda entre as duas faixas de absorção de clorofila permite um pico de reflectância para acontecer em torno de 0,54 μm , que é a região de comprimento de onda verde. Quando uma planta está sob tensão e a produção de clorofila é diminuída, terão uma reflectância mais alta, particularmente na porção vermelha do espectro, parecendo amareladas. Na faixa do infravermelho próximo do espectro, a vegetação verde saudável é caracterizada por uma alta reflectância, alta transmitância e muito baixa absorvância, em comparação com os comprimentos de onda visíveis. É importante notar que, em comparação com a reflectância de uma única folha as camadas de múltiplas folhas podem causar uma reflectância muito mais alta (até 85%) na porção do infravermelho próximo do espectro. Isto é devido à reflectância aditiva, que é a energia transmitida pela primeira camada de folhas (no lugar mais alto) e refletida de uma segunda camada que está parcialmente transmitida por trás da primeira camada. A modelagem de camadas de múltiplas folhas mostra aumentos significantes na reflectância do infravermelho próximo, quando mais camadas de folha são adicionadas.

Os conteúdos de umidade, matéria orgânica e óxido de ferro, bem com as porcentagens relativas de argila, silte e areia e as características de rugosidade da superfície

do solo influenciam, significativamente, a reflectância espectral de solos. Na porção visível do espectro existe uma diminuição distinta na reflectância para solo úmido, em comparação com o solo seco. A região climática e as condições de drenagem devem ser levadas em conta, quando se considera a relação entre reflectância espectral e o conteúdo de matéria orgânica dos solos. Um aumento no óxido de ferro pode causar uma diminuição significativa na reflectância, pelo menos nos comprimentos de onda visível (HOFFER, 1978).

No sistema biológico, as características espectrais da superfície terrestre não permanecem estáticas e mudam com o local e o tempo. Portanto, deve-se levar em consideração as mudanças sazonais ou variabilidade temporal, quando se pretende determinar a melhor época do ano para obtenção dos dados de sensoriamento remoto (HOFFER, 1978).

2.3.2. Sensoriamento remoto na identificação da variabilidade da produtividade

Para que seja viável a utilização do sensoriamento remoto na identificação da variabilidade da produtividade, torna-se necessário, para cada cultura, a identificação da época mais adequada na tomada dos dados. O comportamento espectral para a cultura de trigo de inverno, na faixa do comprimento de onda do infravermelho próximo demonstrou, segundo HAMADA *et al.* (2003), ser um bom indicador de desenvolvimento da cultura. A reflectância no infravermelho próximo apresentou tendência crescente à medida que a porção verde das plantas aumentava, com o máximo valor observado no início do processo de espigamento. Os valores de reflectância decresceram, posteriormente, com o avanço no processo de formação das espigas, florescimento e maturação da cultura.

A estimativa da produtividade a partir de imagens aéreas foi o objetivo de vários trabalhos, mas a grande maioria tratou de culturas anuais. ARAÚJO *et al.* (2000) utilizaram fotografias aéreas 35 mm, obtidas no período de pleno desenvolvimento da cultura de milho, para previsão de produtividade. Correlacionando os valores de pixels com a produtividade, os resultados obtidos nessa pesquisa não possibilitaram afirmações conclusivas. MACHADO *et al.* (2002) concluíram que a utilização de dados orbitais do sensor ETM+ a bordo do satélite Landsat 7 mostrou-se eficiente no mapeamento das diferenças de vigor da cultura, promovendo uma melhor avaliação do potencial de produção da área cultivada com cana-de-açúcar. Com a utilização de imagens do satélite Landsat 7 (sensor ETM+) de dois talhões de cana-de-açúcar, DAAMEN *et al.* (2002) mostraram que a análise por componentes principais em imagens é eficaz na determinação da variabilidade espacial. Os mapas gerados

possibilitaram melhores visualizações, em comparação com as imagens normalmente utilizadas. YANG *et al.* (2002) usaram redes neurais artificiais, para estimar a produtividade de milho e feijão através valores de reflectância de dados de imagens hiperespectrais na faixa do visível e infravermelho próximo. Concluíram que no estágio inicial de desenvolvimento da cultura, com um coeficiente de correlação de 0,66 para milho e 0,76 para feijão, as redes neurais mostraram-se eficientes na estimativa da produtividade.

Em sensoriamento remoto, diversos índices espectrais já foram propostos e utilizados, explorando as diferenças na reflectância espectral do dossel das culturas. Segundo ARAI *et al.* (2001), a densidade de fitomassa foliar ativa, por unidade de área, pode ser determinada a partir do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI), ou seja, a fitomassa verde é mais densa quanto maior for o índice. EPIPHANIO *et al.* (1996), estudando os índices de vegetação NDVI, SAVI (índice de vegetação ajustado para solo) e PVI (índice de vegetação perpendicular), constataram que os solos influenciam os valores dos índices, mesmo quando encontram-se em condições de elevada cobertura. Esses autores afirmam, ainda, que o horário de medição é uma fonte de significativa variação sobre os índices de vegetação, exceto quando a cobertura é de 100%.

VARELLA *et al.* (2003), utilizando técnicas da estatística multivariada, realizaram estudo para propor um vetor de características, extraído de imagens digitais, para a discriminação entre níveis de N na cultura do milho. Nesse estudo, as características foram formadas por um vetor composto por índices de vegetação da reflectância do dossel da cultura. Utilizaram-se os índices NDVI, RNIR (razão do vermelho e infra-vermelho próximo), GNIR (Razão do verde e infravermelho próximo), ARVI (índice de vegetação da resistência atmosférica), SAVI (índice de vegetação ajustador do solo) e GNDVI (índice de vegetação da diferença normalizada do verde). Os autores concluíram que os vetores de características gerados foram capazes de discriminar os níveis de N no estágio fenológico V9 da cultura do milho e que as combinações lineares dos índices de vegetação utilizados foram capazes de estimar os níveis de N.

Alguns trabalhos utilizaram índices na identificação da variabilidade da produtividade. Segundo SIMÕES *et al.* (2003), o NDVI e a reflectância na banda quatro de imagens do satélite Landsat 7 (sensor ETM+), no período correspondente à fase de crescimento vegetativo da cana-de-açúcar, apresentaram um aumento significativo em seus valores. Quando a cultura entrou na fase de maturação, esses valores estabilizaram e finalmente, ocorreu uma queda na reflectância em virtude do aumento na quantidade de palha na cultura e

senescência. Os autores afirmam, ainda, que alguns estudos mostraram uma alta correlação do NDVI com parâmetros associados ao desenvolvimento e produtividade das plantas. DAAMEN *et al.* (2003) afirmam que o NDVI foi o melhor índice para correlacionar-se com o erro de estimativa de safra de uma produção de cana-de-açúcar. Tucker *et al.* (1980), citado por HAMADA *et al.* (2003), afirmam que foram observadas relações lineares significativas entre o índice de vegetação NDVI e a produtividade de grãos, em um experimento de trigo de inverno. Os dados espectrais correlacionaram-se mais no período de tempo de cinco semanas, entre os estádios de desenvolvimento da planta do alongamento ao florescimento, sendo menos correlacionados no início e no final do ciclo de crescimento do trigo.

ARAÚJO *et al.* (2004), avaliando imagens obtidas por meio de videografia aérea digital multiespectral, quanto a seu potencial na determinação de zonas de manejo e estimativa de produtividade de culturas de grãos, concluíram que a videografia é um instrumento eficiente na determinação de zonas de manejo em áreas, que apresentam grande variabilidade espacial. Concluíram também que imagens, obtidas por meio de videografia aérea digital multiespectral, podem gerar relações significativas com as produtividades de grãos e que as imagens NDVI apresentaram maior coeficiente de determinação na regressão com a estimativa da produtividade.

Para a cultura do café, o sensoriamento remoto tem sido usado, principalmente, no mapeamento e caracterização de áreas produtivas. Em trabalho correlacionando as variáveis da cultura cafeeira com suas respostas espectrais em imagens TM/Landsat-5, VIEIRA *et al.* (2000) concluíram que a cultura apresenta resposta espectral bastante complexa e sofre alterações ao longo do ano, necessitando, portanto, que avaliações temporais sejam realizadas. Os autores ainda aconselham a associação de produtos de sensores remotos de maior resolução espacial, para permitir o levantamento e monitoramento da resposta espectral em cafeeiros, em regiões para as quais o imageamento orbital não é beneficiado, como é o caso da Zona da Mata. EPIPHANIO *et al.* (1994), estudando as relações entre variáveis biofísicas de cafezais e sua resposta espectral em imagens TM/Landsat-5, concluíram que os parâmetros culturais referentes às características biofísicas da planta foram mais bem correlacionados com a reflectância do que os parâmetros relativos ao substrato ou os parâmetros geomorfológicos do terreno. Em uma área-piloto representativa da cafeicultura da região do Sul de Minas Gerais, usando imagens orbitais TM/Landsat-5, HURTADO *et al.* (2003) concluíram que, para a região em estudo mediante treinamento para a classificação supervisionada por máxima verossimilhança e uma análise temporal das imagens, podem-se

estimar de maneira mais precisa as áreas com ocupação cafeeira, ajudando na detecção de pequenas variações e dando uma maior segurança na determinação de áreas já ocupadas com a cultura. Em trabalho em lavouras cafeeiras no centro-sul do Estado de Minas Gerais com uso de imagens Landsat 5 e 7, MOREIRA *et al.* (2003) observaram que, embora o café seja uma cultura perene, a melhor época para o mapeamento desta cultura, através de dados orbitais, é nos meses mais secos, em que o contraste espectral de áreas cafeeiras e outros alvos de ocupação do solo é maior.

3. MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi desenvolvido durante a safra 2003/2004, no Laboratório de Projetos de Máquinas e Visão Artificial (PROVISAGRO) do Departamento de Engenharia Agrícola e Ambiental da Universidade Federal de Viçosa e na Fazenda Braúna, município de Araponga, Zona da Mata de Minas Gerais. Esta região apresenta características típicas da cafeicultura de montanha: relevo, variedade cultivada e tratos culturais. A propriedade possui área total de 306 hectares, sendo 86 hectares implantados com a cultura do café de espécie *Coffea arabica* L.. O tipo de solo predominante é o Latossolo Vermelho Amarelo e a altitude média da propriedade é de, aproximadamente, 900 metros.

Foram selecionadas seis áreas para implantação das parcelas experimentais (Fig. 1), sendo que, dentro de cada área, as plantas possuíam mesma a idade, variedade e espaçamento (Tab. 1). O levantamento topográfico planimétrico da fazenda e a delimitação das áreas foram realizados utilizando-se um GPS diferencial Trimble Pro XRS em um trabalho paralelo da equipe de pesquisa do laboratório PROVISAGRO. Três subáreas de aproximadamente 30x30m (Fig. 2) foram demarcadas, dentro de cada área, por meio de estacas de madeira e georreferenciadas com uso de um GPS diferencial Trimble Pro XRS. A correção diferencial foi do tipo pós-processada com uso da estação-base Viçosa da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC) do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE).

A colheita do café na propriedade iniciou-se no dia 31 de maio e terminou no dia 30 de julho do ano de 2004. Foi determinada a produção de café úmido de cada subárea e amostras compostas foram retiradas para determinação da massa estimada de café úmido verde, cereja e passa seco, com duas repetições de acordo com a Equação 1. Para cada subárea, determinou-se a umidade das amostras de cada estágio de maturação, por meio do método padrão de estufa, $105^{\circ}\text{C} \pm 3$ por 24 horas (BRASIL, 1992) com três repetições. A Figura 3 ilustra o critério de separação das amostras entre os diferentes estágios de maturação (café verde, cereja e passa seco) e impurezas do experimento.

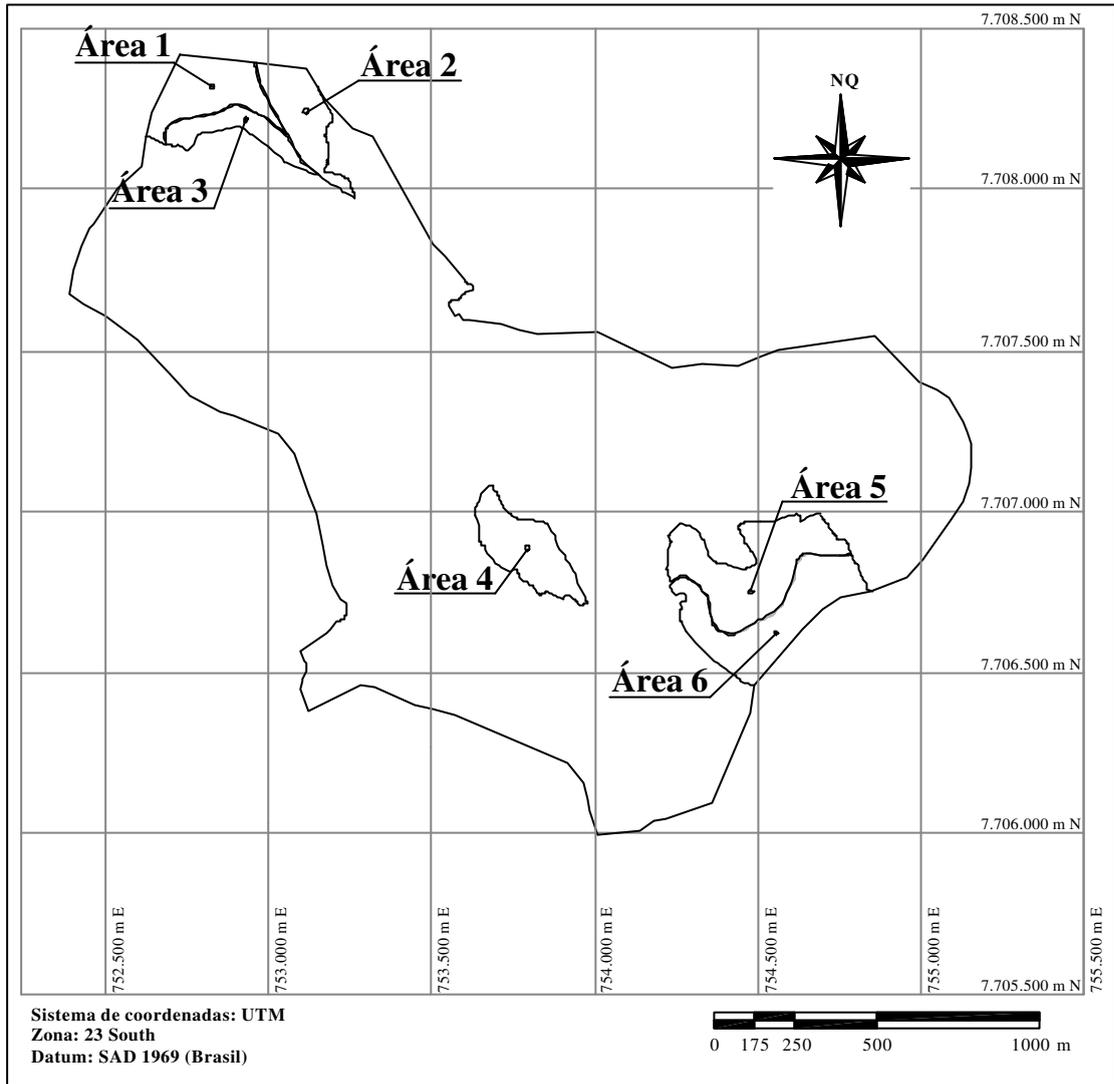


Figura 1. Localização e delimitação das parcelas experimentais na fazenda.

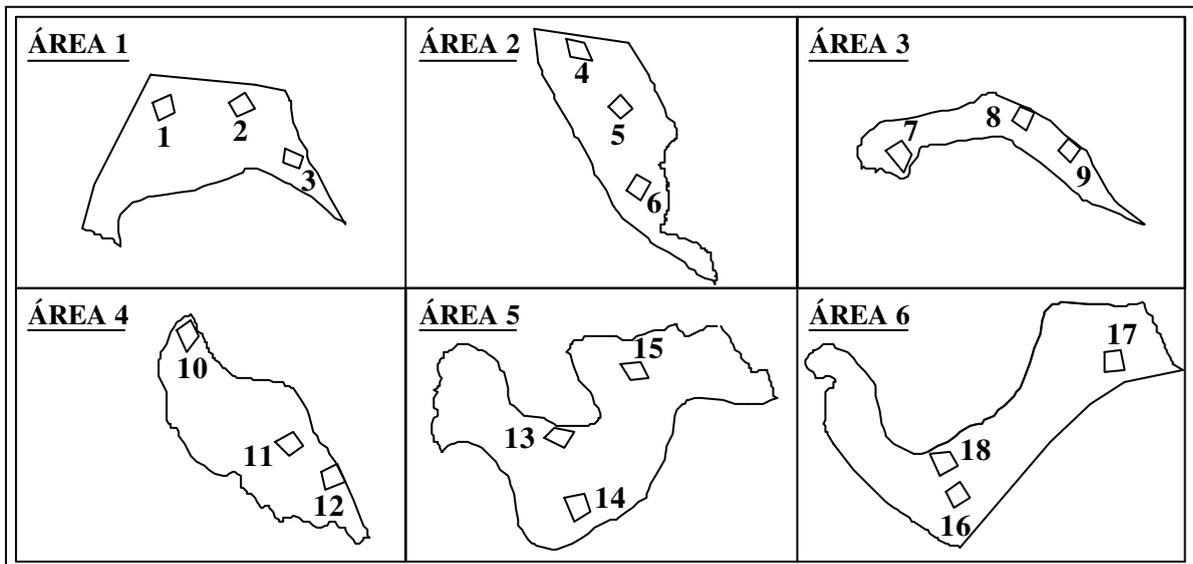


Figura 2. Localização, identificação e delimitação das subáreas dentro de cada área.

Tabela 1. Caracterização das parcelas experimentais

Áreas	Época de Plantio	Espaçamento (m)	Variedade	Área (ha)
1	MAR 96	2,00 x 0,75	Catimor	5,28
2	DEZ 97 / FEV 98	2,50 x 0,75	Catuaí 44	4,65
3	MAR 95	1,25 x 0,75	Catuaí 99	2,76
4	DEZ 98	2,00 x 0,50	Catuaí 99	5,55
5	DEZ 00	2,00 x 0,50	Catucaí	9,74
6	DEZ 99	2,00 x 0,50	Catucaí	8,42

$$m_i = \frac{Psa \cdot m_{ia}}{m_a} \quad (1)$$

em que,

m_i = massa total calculada de café úmido para o estágio de maturação i (v, c e p correspondem aos estádios de maturação verde, cereja e passa seco), kg;

Psa = produção total de café úmido da sub-área, kg;

m_{ia} = massa de café úmido da amostra para o estágio de maturação i (verde, cereja e passa seco), kg; e

m_a = massa total de café úmido da amostra, kg.



Figura 3. Café verde, cereja, passa seco e impurezas.

As umidades e as massas estimadas de cada estágio de maturação foram utilizadas, a fim de corrigir a produtividade para a umidade padrão de 12% (Eq. 2), obtendo-se então, a produtividade do café em coco ou seco. A lavoura foi submetida aos tratos culturais normais, cujo procedimento ficou a cargo do produtor.

$$P_c = \frac{m_v \left(\frac{100 - U_v}{100 - U_f} \right) + m_c \left(\frac{100 - U_c}{100 - U_f} \right) + m_p \left(\frac{100 - U_p}{100 - U_f} \right)}{A} \quad (2)$$

em que,

P_c = produtividade de café seco (coco) corrigida, $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$;

U_v = umidade do café verde, % b.u.;

U_c = umidade do café cereja, % b.u.;

U_p = umidade do café passa seco, % b.u.;

U_f = umidade padrão, % b.u.; e

A = área da sub-área, ha.

3.1. Aquisição das imagens aéreas

Para avaliar a viabilidade da utilização de sensoriamento remoto aerotransportado na estimativa e identificação da variabilidade da produtividade do cafeeiro, foram utilizadas as dezoito subáreas já citadas anteriormente. Para o acompanhamento da cultura, foram feitas visitas de campo e as imagens foram adquiridas nos dias nove de setembro e 27 de novembro de 2003, período este antecedente à colheita. As imagens do dia nove de setembro de 2003 foram adquiridas no intervalo de tempo entre 15 horas e 30 minutos e 16 horas e 50 minutos e as imagens do dia 27 de novembro de 2003 no intervalo entre 15 horas e 40 minutos e 16 horas e 20 minutos. Nos dois períodos, as condições atmosféricas apresentaram-se favoráveis à aquisição das imagens aéreas com céu claro.

Na obtenção das imagens aéreas, foi utilizado um avião Cessna (Fig. 4a) de propriedade do Núcleo de Estudos de Planejamento e Uso da Terra (NEPUT), devidamente preparado, sendo nele montado um sistema de aquisição de imagens (Fig. 4b). Esse sistema era composto por uma câmera digital DUNCANTECH modelo MS 3100 (Fig. 4c), com lente de 17 mm de comprimento focal, uma placa de aquisição de vídeo NATIONAL INSTRUMENTS PCI 1424 e um microcomputador.

A câmera é dotada de três CCD's (Charged Couple Device) e adquire, simultaneamente, imagens coloridas (RGB) e falsa-cor (CIR) com resolução radiométrica de 8 bits. Nas imagens CIR, são adquiridas uma imagem na banda do infravermelho próximo, uma imagem na banda do vermelho e uma imagem na banda do verde. Um CCD era destinado à coleta da banda do vermelho (Vm), outro à coleta do infravermelho próximo (IV) e o terceiro à coleta das bandas verde e azul (Vd-Az). A lente permitia o controle manual da abertura da íris, em que o "f-stop" foi definido em 5,6. A Tabela 2 apresenta o ganho e tempo

de exposição, utilizados para cada CCD na aquisição das imagens aéreas, juntamente, com suas resoluções espectrais.



(a)



(c)



(b)

Figura 4. (a) Avião Cessna, (b) sistema de aquisição de imagens e (c) câmera digital DUNCANTECH modelo MS 3100.

Tabela 2. Ganho, tempo de exposição e resoluções espectrais para cada um dos três CCD (Charged Couple Device) nas bandas do vermelho (Vm), infravermelho próximo (IV) e do verde e azul (Vd-Az) para um “f-stop” de 5,6

CCD	Tempo de exposição (ms)	Ganho (dB)	Resolução Espectral (nm)
Vm	82	102	600 - 700
IV	82	81	700 - 1.100
Vd-Az	42	50	400 - 600

As imagens foram tomadas a aproximadamente 2.000 metros de altura, gerando, assim, uma resolução espacial de aproximadamente 0,50 metros, correspondendo a uma área aproximada de 750 por 560 metros. A imagem salva possuía dimensão de 1.392 pixels na horizontal e 1.040 pixels na vertical. Para as tomadas das imagens, foi elaborado um plano de voo para que elas tivessem uma sobreposição entre linhas em torno de 40%. Essa sobreposição foi feita, a fim de evitar a supressão de informações na aquisição das imagens devido a uma possível instabilidade da aeronave.

3.2. Processamento das imagens aéreas

Para que as subáreas, nas quais foi determinada a produtividade, fossem identificadas nas imagens aéreas, foi necessário georreferenciá-las. Neste procedimento, foram utilizados polinômios de primeiro grau e selecionados, nas imagens, os pontos perfeitamente identificáveis (mínimo seis), sendo que as coordenadas reais desses pontos foram obtidas do levantamento topográfico planimétrico da fazenda. O erro médio quadrático dos pontos utilizados no georreferenciamento das imagens, foram inferiores a um metro. Com este processo, foi possível estudar a relação da produtividade obtida nas dezoito subáreas com as imagens aéreas. O georeferenciamento das imagens foi realizado no programa SPRING (sistema de processamento de informações georreferenciadas, versão 4.0).

No processamento das imagens aéreas, objetivou-se à redução da dimensionalidade dos dados e o realce da informação desejada, condensando a informação contida nas imagens em índices espectrais. As 18 subáreas foram recortadas com auxílio do programa SPRING e processadas com uso do programa MATLAB versão 6.5, determinando-se os índices espectrais V_{dn} , V_{mn} , IV_n , RV_m , RV_d , $NDVI$, $GNDVI$ e $SAVI$ de acordo com as equações de 3 a 10. Foram obtidas as médias dos valores numéricos dos pixels das imagens-índices de cada sub-área também com uso do programa MATLAB.

$$V_{dn} = \frac{V_d}{IV + V_m + V_d} \quad (3)$$

em que,

V_{dn} = banda verde normalizada;

V_d = valor numérico do pixel na banda do verde;

IV = valor numérico do pixel na banda do infravermelho; e

V_m = valor numérico do pixel na banda do vermelho.

$$V_{mn} = \frac{V_m}{IV + V_m + V_d} \quad (4)$$

em que,

V_{mn} = banda vermelho normalizada.

$$IV_n = \frac{IV}{IV + V_m + V_d} \quad (5)$$

em que,

IV_n = banda infravermelho normalizada.

$$RV_m = \frac{V_m}{IV} \quad (6)$$

em que,

RV_m = razão de vermelho e infravermelho.

$$RV_d = \frac{V_d}{IV} \quad (7)$$

em que,

RV_d = razão de verde e infravermelho.

$$NDVI = \frac{IV - V_m}{IV + V_m} \quad (8)$$

em que,

NDVI = índice de vegetação da diferença normalizado.

$$GNDVI = \frac{IV - V_d}{IV + V_d} \quad (9)$$

em que,

GNDVI = índice de vegetação da diferença de verde normalizado.

$$SAVI = \frac{IV - V_m}{IV + V_m + 0,5} \cdot 1,5 \quad (10)$$

em que,

SAVI = índice de vegetação ajustador do solo.

Para que fossem identificados, nas imagens aéreas, os carregadores e áreas não implantadas com a cultura do café, as imagens foram processadas com uso do programa MATLAB, determinando-se um índice espectral, cujo valor dos pixels nas imagens-índices, nas regiões referentes aos carregadores diferenciassem, ao máximo, dos valores de pixels nas regiões das áreas implantadas com café. Esse índice constituiu-se da razão entre a soma dos valores numéricos dos pixels na banda do vermelho e verde e os valores numéricos dos pixels na banda do infravermelho. Assim, os valores dos pixels nas áreas referentes aos carregadores nas imagens-índices possuíram valores maiores que nas áreas implantadas com a cultura do

café, pois, na região do infravermelho próximo, a reflectância do dossel é bem maior que a do solo. Para discriminar áreas implantadas com a cultura do café dos carregadores e áreas não implantadas com a cultura, foram definidas imagens-máscaras na geração dos mapas de produtividade estimados. Essas imagens foram obtidas com um processo de limiarização das imagens-índices. Para isso, foi elaborada uma rotina interativa no programa MATLAB na definição do limiar. Os valores de pixels nas imagens-índices acima do limiar definido (carregadores e áreas não implantadas com a cultura do café) assumiram valores de pixels de 255 e os valores de pixels abaixo do limiar definido (áreas implantadas com a cultura do café) valores zero.

3.3. Análise das imagens aéreas

Para estimativa da variabilidade espacial da produtividade, definiu-se um modelo por meio de análise de regressão. Esse modelo foi utilizado na geração de mapas estimados da variabilidade da produtividade com uso do programa MATLAB.

Para efeito de análises estatísticas, utilizou-se utilizado um delineamento inteiramente casualizado, em que as diferentes áreas foram consideradas como um fator primário designado às parcelas e as diferentes avaliações mensais (épocas de tomadas de imagens) como sendo um fator secundário designado às subparcelas, caracterizando, assim, um experimento em parcelas subdivididas no tempo (SNEDECOR & COCHRAN, 1989; STEEL *et al.*, 1997). As médias das imagens-índices das diferentes subáreas, dentro de cada área, foram consideradas como diferentes repetições.

3.3.1. Seleção dos índices que melhor detectaram a variabilidade espacial da produtividade

Foi realizada uma análise de variância para cada índice, considerando-se o modelo estatístico de um delineamento inteiramente casualizado, no esquema em parcelas subdivididas no tempo. A fonte de variação interação avaliou a dependência de efeitos entre o fator primário (área) e o fator secundário (época). Selecionaram-se os índices, que resultaram em teste F não-significativo para interação e significativo para área e época.

3.3.2. Estudo da produtividade em função de índices

Para cada uma das duas épocas, foram ajustados modelos lineares de regressão de primeiro e segundo grau da produtividade, pelo Método dos Mínimos Quadrados, em função dos valores dos índices selecionados usando o programa SAS (SAS, 1999). Selecionou-se aquele modelo, que apresentava menor significância na análise de variância da regressão. A seleção da melhor época ocorreu, como consequência da seleção do modelo de regressão. Tal análise de regressão teve, como objetivo, verificar a existência de uma relação funcional significativa entre a produtividade e os índices selecionados. Pelo fato de a variável independente (índice) ser também aleatória como a produtividade, o modelo ajustado é válido, desde que interpretados como condicionados aos valores dos índices observados (HOFFMANN & VIEIRA, 1977).

Utilizou-se o modelo ajustado para a elaboração de mapas estimados da produtividade e determinação da produtividade total das seis áreas em estudo com uso dos programas MATLAB e SPRING. Foi elaborada uma rotina no programa MATLAB, para que a resolução espacial dos mapas gerados fosse, aproximadamente, cinco metros. Este procedimento foi realizado com deslocamento de uma grade de 10 por 10 pixels na imagem-índice, em que o valor de produtividade, para cada grade, foi obtido com a média dos valores-índices e o modelo ajustado. As faixas de produtividade baixa, moderada e alta foram definidas em três intervalos iguais, a partir do valor máximo fornecido pelo modelo.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores médios e respectivos coeficientes de variação da percentagem dos estádios de maturação das áreas são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Valores médios da percentagem dos estádios de maturação e coeficiente de variação das áreas

Área	Verde		Cereja		Passa seco	
	Média (%)	CV (%)	Média (%)	CV (%)	Média (%)	CV (%)
1	12,16	17,68	11,60	92,15	76,14	11,40
2	16,01	34,01	15,07	58,54	68,92	20,46
3	-	-	-	-	-	-
4	26,09	5,75	20,86	2,48	53,07	1,85
5	5,63	33,66	76,78	6,73	17,58	20,69
6	4,35	53,48	5,51	42,65	90,14	5,08

Para obter um café de melhor qualidade, VILELA (1997) recomenda que a colheita seja iniciada quando a percentagem de frutos verdes for inferior a 5%. Entretanto, os produtores de café estão acostumados a iniciar o processo de colheita, quando se tem mais que 80% de frutos maduros para aumentar o tempo disponível para a colheita. Assim, visam reduzir a necessidade de mão-de-obra para a colheita, assim com diminuir a necessidade de capacidade do sistema de secagem.

Na Tabela 3, observa-se que a área 6, apesar de apresentar teor de frutos verdes médio abaixo de 5%, apresentou teor de frutos passa seco médio acima de 90%, o que também limita a qualidade do produto final. A área 4 foi a única que iniciou a colheita com teor de frutos verdes médio acima de 20%. A área 5 apresentou teor de frutos verdes médio abaixo de 20% e teor de frutos cereja médio acima de 70%. Entre as áreas estudadas, esta foi a que apresentou condição mais favorável à obtenção de produto final de qualidade superior e maior produtividade.

Os coeficientes de variação da percentagem de frutos nos diferentes estádios de maturação verde, cereja e passa seco entre as diferentes áreas foram 69,84, 105,80 e 46,44% respectivamente. Estes valores são, segundo a classificação de GOMES (1981), muito altos

nos ensaios agrícolas de campo, evidenciando a variabilidade. Verifica-se variabilidade também nos estádios de maturação dentro das mesmas áreas. Estes fatos dificultam a utilização de um único fator de correção da umidade, para obtenção de mapas de produtividade em áreas de café. A alta variabilidade apresentada nos diferentes estádios de maturação, além de proporcionar prejuízos à qualidade, mostra a dificuldade em definir o início da colheita.

Os valores calculados da produtividade de café seco (coco) corrigida para a umidade padrão de 12% de cada subárea, produtividade média e coeficiente de variação são apresentados na Tabela 4 juntamente com a área de cada subárea.

Os coeficientes de variação da produtividade, com exceção da área 3, que não apresentou produção, foram muito altos segundo a classificação de GOMES (1981). Considerando as áreas que produziram, a variabilidade da produtividade tendeu ser maior nas áreas, que apresentaram menor produtividade.

A área 3 foi a única, que não apresentou produtividade para todas suas repetições. Com a época de plantio em março de 1995 e espaçamento 1,25 por 0,75 metros, esta área é, dentre as áreas estudadas, a que possuía menor espaçamento entre linhas e época de plantio mais antiga (nove anos), estando fora do intervalo de tempo de maior floração e produção do cafeeiro que, segundo GUIMARÃES *et al.* (2002), é de cinco a oito anos.

Entre as áreas estudadas, apenas as áreas 1 e 2 apresentaram população em torno de 6.000 plantas por hectare. Segundo RENA *et al.* (2003), há várias evidências de que esta seja a população, que proporciona maiores produtividades. As áreas que tenderam a apresentar maiores valores de produtividade foram as 5 e 4, e ambas possuem população em torno 10.000 plantas por hectare (espaçamento de 2,00 por 0,50 metros). A subárea 10 foi a única que não apresentou produção dentre as subáreas da área 4. De acordo com os proprietários e funcionários da fazenda, esta subárea sofreu um processo de amarelamento, no período antecedente à colheita, cuja causa não foi identificada.

Mediante a variabilidade observada, a agricultura de precisão mostra-se como uma importante ferramenta, que possibilita monitorar a atividade agrícola em nível local. Com base no manejo diferenciado de áreas na cafeicultura, torna-se possível praticar uma agricultura sustentável com produção a custos competitivos e baixa agressão ao meio ambiente.

Tabela 4. Valores calculados da produtividade de café seco (coco) corrigida para a unidade padrão de 12% de cada subárea e produtividade média, coeficiente de variação de cada área

Área	Subárea	Área (ha)	Produtividade		
			Subárea (kg.ha ⁻¹)	Média da área (kg.ha ⁻¹)	CV (%)
1	1	0,0884	54,25	35,75	86,63
	2	0,0756	0,00		
	3	0,0676	53,01		
2	4	0,0726	231,06	441,78	58,59
	5	0,0851	363,60		
	6	0,0945	730,68		
3	7	0,1043	0,00	0,00	0,00
	8	0,0870	0,00		
	9	0,0863	0,00		
4	10	0,1035	0,00	1723,71	86,87
	11	0,0923	2703,62		
	12	0,0998	2467,51		
5	13	0,0973	2348,31	2204,68	44,39
	14	0,1091	1162,12		
	15	0,0840	3103,61		
6	16	0,0887	326,09	274,77	55,01
	17	0,0869	104,63		
	18	0,1110	393,57		

Em geral a produtividade mostrou-se baixa em relação ao potencial de produção da região. Considerando um rendimento de 50% na obtenção de café beneficiado a partir de café em coco, as áreas apresentaram valor médio aproximado de nove sacas por hectare. Este valor está abaixo da produtividade do Estado e da região, pois, de acordo com a CONAB (2004), a produtividade para o Estado de Minas Gerais na safra 2003/2004 foi de 12,33 sacas por hectare, enquanto atingiu 11,21 para a Zona da Mata e Jequitinhonha. Uma das características do cafeeiro é sua biennialidade, e na região do município de Araponga, a safra de 2003/04 foi considerada como de baixa produção.

4.1. Processamento das imagens aéreas

A Figura 5 ilustra exemplos de recortes das imagens falsa-cor (CIR), obtidas no dia nove de setembro e 27 de novembro de 2003 para a mesma subárea. Observam-se,

visualmente, diferenças nas tonalidades entre os recortes nas imagens falsa-cor (CIR) nas duas épocas analisadas.

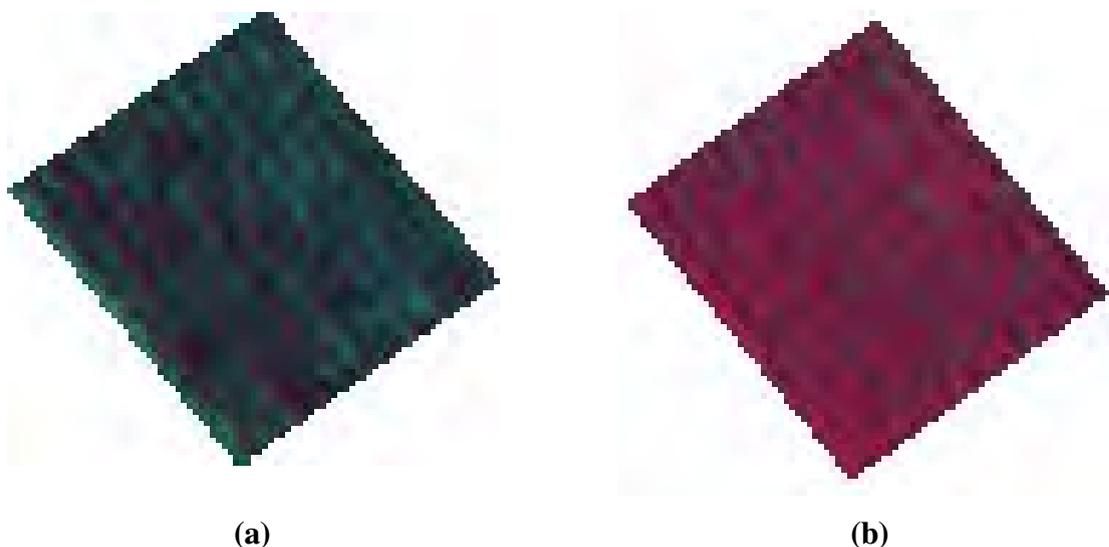


Figura 5. Exemplo de recortes resultantes do georreferenciamento da subárea 5 das imagens falsa-cor (CIR) obtidas no dia nove de setembro de 2003 (a) e 27 de novembro de 2003 (b).

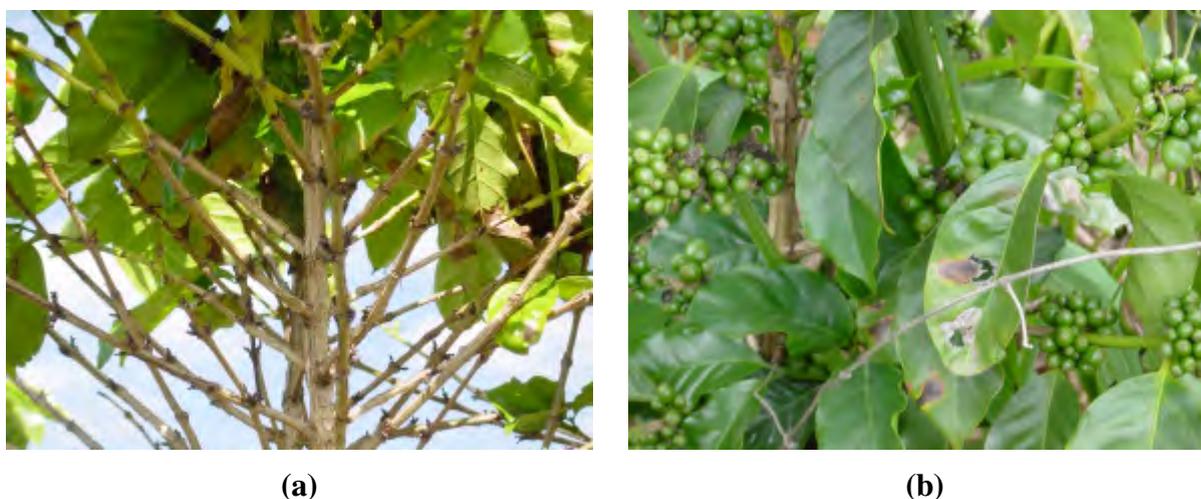


Figura 6. Situação da cultura no dia nove de setembro (a) e 27 de novembro de 2003 (b).

Na época de tomada do primeiro conjunto de imagens, a cultura encontrava-se em situação de recuperação e no final do período da seca, com baixo grau de enfolhamento devido à colheita referente à safra anterior (Fig. 5a). A presença de plantas invasoras foi menor nesta época, por estar no período da seca. Na época de tomada do segundo conjunto de imagens, a cultura encontrava-se, em sua maioria, em processo de enchimento do fruto, o

chamado “chumbinho”, na segunda florada no período das águas (Fig. 5b). A Figura 6 ilustra a situação média da cultura, nas duas épocas.

De acordo com HOFFER (1978), a modelagem de camadas de múltiplas folhas mostra aumentos significantes na reflectância do infravermelho próximo, quando mais camadas de folha são adicionadas. Assim, nas imagens falsa-cor obtidas no dia 27 de novembro de 2003, a reflectância na faixa do infravermelho próximo aumentou, significativamente, devido ao maior grau de enfolhamento, em comparação com as imagens obtidas no dia nove de setembro de 2003.

4.2. Análise das imagens aéreas

No modelo estatístico do experimento, os índices que resultaram em teste F não-significativo para interação implicam que o fator primário (área) atua independentemente do fator secundário (época); portanto, deve-se estudar, isoladamente, os dois fatores. Quando o teste F para o fator primário (área) for significativo, implica que existe pelo menos um contraste entre as médias dos índices, que é estatisticamente diferente de zero. O mesmo raciocínio é válido para o teste F para o fator secundário (época). Este critério foi adotado com a finalidade de se escolher um índice que diferenciasses áreas e épocas e que os efeitos de áreas e época atuassem independentes.

A Tabela 5 apresenta os resultados para o teste F, referentes à análise de variância do experimento para interação (área*época), fator primário (áreas) e fator secundário (épocas) para os índices Vdn, Vmn, IVn, RVm, RVd, NDVI, GNDVI e SAVI.

A Tabela 5 mostra que, dentre os oito índices estudados, o único que apresentou teste F não-significativo para interação (área*época) e significativo para os fatores primários (áreas) e secundários (época), ao nível de 5% de probabilidade na análise de variância do experimento, foi o da banda verde normalizado (Vdn). O índice da banda vermelho normalizada (Vmn) apresentou valor não significativo para interação, porém não-significativo para o fator primário (áreas) e significativo para o fator secundário (época). Os demais índices apresentaram resultados significativos para interação.

Os gráficos de dispersão da produtividade em função dos valores da banda verde normalizado (Vdn), para as épocas nove de setembro e 27 de novembro de 2003, são apresentados nas figuras 7 e 8, respectivamente.

Tabela 5. Resultados do teste F, referentes a análise de variância do experimento para interação (área*época), fator primário (áreas) e fator secundário (épocas) para os índices Vdn, Vmn, IVn, RVm, RVd, NDVI, GNDVI e SAVI

Índice	FV	GL	QM	F	Pr > F
Vdn	Área (A)	5	0,0054	6,93	0,0029
	Época (B)	1	0,0326	94,82	< 0,0001
	Interação (AxB)	5	0,0008	2,77	0,0693
Vmn	Área (A)	5	0,0035	2,73	0,0712
	Época (B)	1	0,1292	294,91	< 0,0001
	Interação (AxB)	5	0,0013	2,70	0,0738
IVn	Área (A)	5	0,0169	6,26	0,0044
	Época (B)	1	0,2915	728,67	< 0,0001
	Interação (AxB)	5	0,0041	10,18	0,0005
RVm	Área (A)	5	0,1898	5,15	0,0094
	Época (B)	1	3,6324	117,11	< 0,0001
	Interação (AxB)	5	0,1235	6,02	0,0052
RVd	Área (A)	5	0,2861	8,80	0,0010
	Época (B)	1	3,4108	232,37	< 0,0001
	Interação (AxB)	5	0,1499	10,22	0,0005
NDVI	Área (A)	5	0,0683	4,75	0,0126
	Época (B)	1	1,7375	472,03	< 0,0001
	Interação (AxB)	5	0,0260	7,05	0,0027
GNDVI	Área (A)	5	0,0700	7,61	0,0020
	Época (B)	1	0,8413	348,56	< 0,0001
	Interação (AxB)	5	0,0208	8,60	0,0012
SAVI	Área (A)	5	0,1999	7,59	0,0020
	Época (B)	1	2,7233	455,19	< 0,0001
	Interação (AxB)	5	0,0570	9,53	0,0007

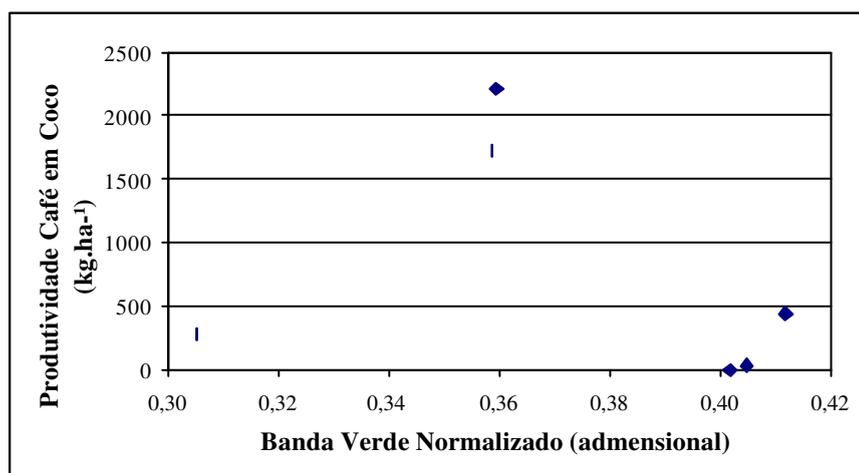


Figura 7. Diagrama de dispersão da produtividade em função dos valores normalizados do índice Vdn para a época nove de setembro de 2003.

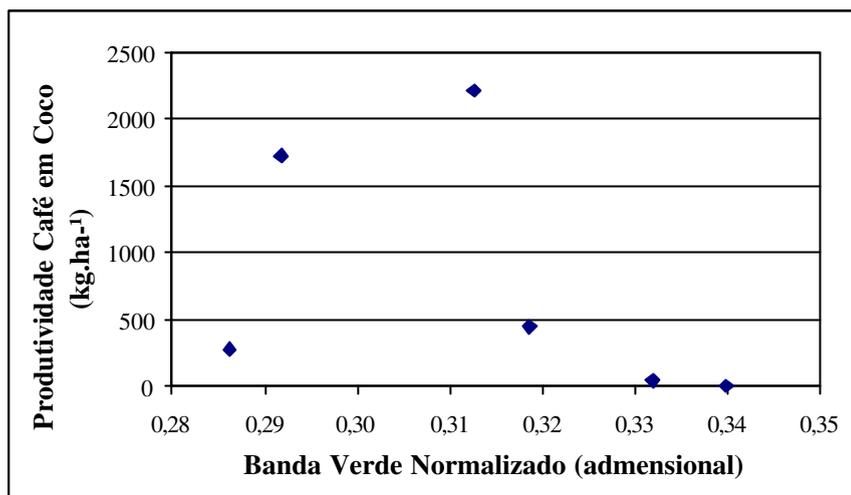


Figura 8. Diagrama de dispersão da produtividade em função dos valores normalizados do índice Vdn para a época 27 de novembro de 2003.

Observa-se que a produtividade, em função do índice Vdn, apresentou tendência quadrática principalmente no diagrama referente à época nove de setembro de 2003. DALEZIOS *et al.* (2001), em trabalho visando à estimativa da produtividade de algodão, utilizando imagens do satélite NOAA/AVHRR e o índice espectral NDVI, mostraram que um modelo quadrático foi satisfatório na estimativa da produtividade. A época nove de setembro de 2003 foi a mais próxima do final da colheita referente à safra 2002/2003; assim, em sua maioria, a cultura encontrava-se com mesmo potencial de produção para a próxima safra (2003/2004). Nessa época, a reflectância do dossel da cultura não sofreu tanta influência de plantas invasoras nas entrelinhas, por estar no período da seca. Por outro lado, a resposta espectral do dossel da cultura nas imagens obtidas na época 27 de novembro de 2003 sofreu influência devido à presença de plantas invasoras nas entrelinhas, por estar no período das águas, principalmente nas áreas que apresentam maior espaçamento entre linhas.

Modelos lineares de regressão de primeiro e de segundo grau da produtividade foram ajustados em função dos valores de Vdn para cada uma das duas épocas estudadas. A Tabela 6 apresenta os resultados do teste F na análise de variância das regressões desses modelos.

Adotou-se o modelo de segundo grau para o conjunto de imagens do dia nove de setembro de 2003, pois, este apresentou a menor significância de 7,91% no teste F na análise de variância das regressões. A Equação 11 ilustra o modelo ajustado referente ao índice Vdn e o conjunto de imagens obtido no dia nove de setembro de 2003. O modelo ajustado apresentou um coeficiente de determinação de 0,82 e como a variável independente, índice Vdn, é também aleatória, segundo HOFFMANN e VIEIRA (1977), o modelo ajustado é

válido, desde que interpretado como condicionado aos valores observados do índice Vdn, ou seja, no intervalo de 0,31 a 0,41. Os valores de produtividade, obtidos com os valores de índice, que estavam fora deste intervalo, foram considerados nulos.

Tabela 6. Resultados do teste F na análise de variância da regressão do modelo linear de primeiro e segundo grau da produtividade em função dos valores normalizados do índice selecionado Vdn nas épocas nove de setembro e 27 de novembro de 2003

Época	FV	GL	QM	F	Pr > F
09/09/2003	Modelo 1°	1	399.713	0,39	0,5640
27/11/2003	Modelo 1°	1	847.819	0,94	0,3870
09/09/2003	Modelo 2°	2	1.816.095	6,64	0,0791
27/11/2003	Modelo 2°	2	1.149.972	1,60	0,3361

O modelo ajustado foi utilizado na geração de mapas de tendência de produtividade com uso do conjunto de imagens referentes ao dia nove de setembro de 2003. Foi elaborada uma rotina no programa MATLAB, adotando-se os seguintes critérios: produtividade considerada baixa (de zero a 630 kg.ha⁻¹), produtividade moderada (de 630 a 1260 kg.ha⁻¹) e produtividade alta (acima de 1260 kg.ha⁻¹). As figuras 9 a 14 ilustram os mapas de tendências de produtividade das áreas 1 a 6, respectivamente, processadas por meio do modelo ilustrado na Equação 11.

$$P = -76323 + 440476 \cdot Vdn - 620432 \cdot Vdn^2 \quad (11)$$

em que,

Vdn = valor do pixel calculado do índice banda verde normalizada; e

P = produtividade (kg.ha⁻¹).

Nos mapas de produtividade estimada, observa-se que o processo proposto de limiarização sobre as imagens-índices propostas mostrou-se satisfatório na discriminação entre os carregadores e áreas implantadas com a cultura do café.

A maior parte da área 1 (Fig. 9), apresentou tendência para baixa produtividade. Apenas no canto superior esquerdo, apresentou tendência de produtividade moderada. Na área 2 (Fig. 10), observa-se a ocorrência de mistura de tendências de produtividade. No campo, verificou-se que a cultura responde realmente desta maneira, pois, em uma pequena área existe uma planta com alta produção, enquanto nas suas vizinhas a produção foi baixa ou nula.

A Figura 11 referente à área 3 apresentou áreas distintas de tendência moderada e alta produtividade na metade direita da figura. Entretanto, todas as subáreas amostradas nessa área não produziram. Em campo, observou-se que, na área citada, nas épocas de tomada de vãos, a cultura estava infestada da planta daninha *Momordica charantia*, o chamado melão de São Caetano, influenciando no erro da avaliação de estimativa de produtividade.

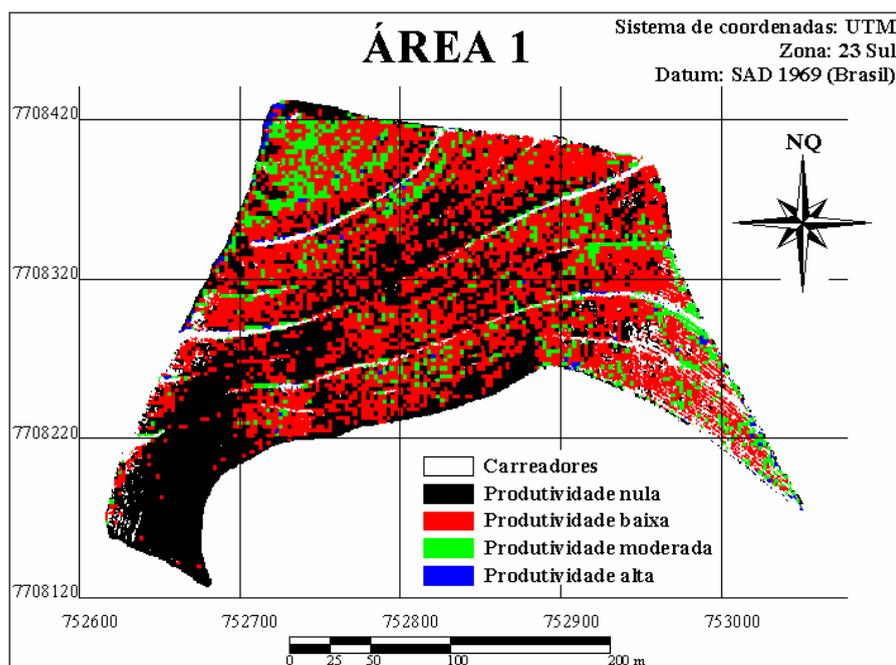


Figura 9. Mapa de produtividade estimada para a área 1.

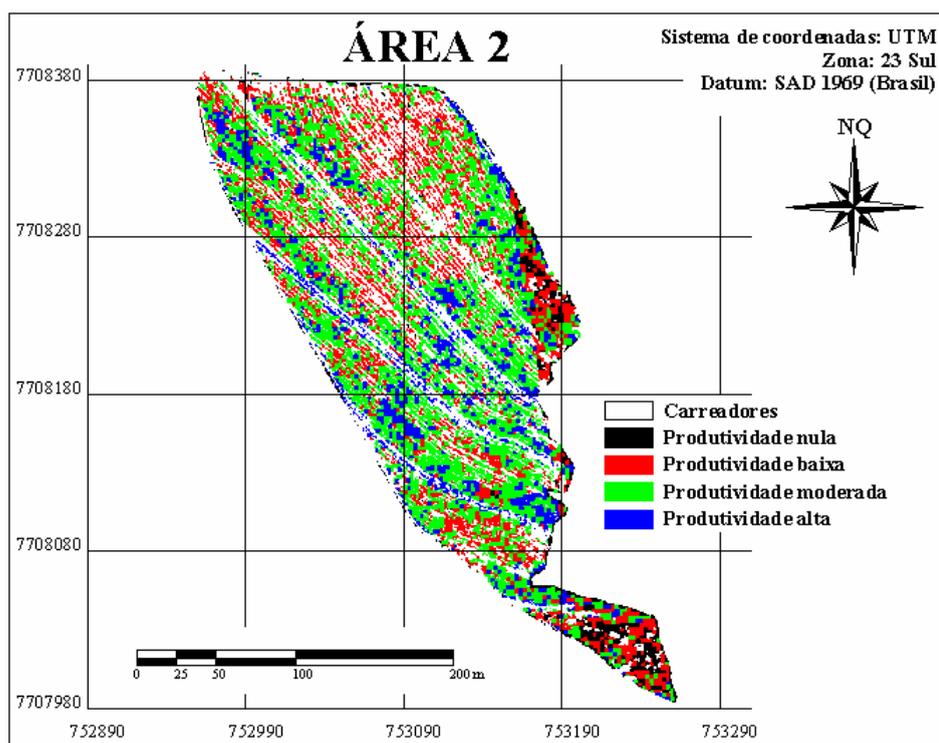


Figura 10. Mapa de produtividade estimada para a área 2.

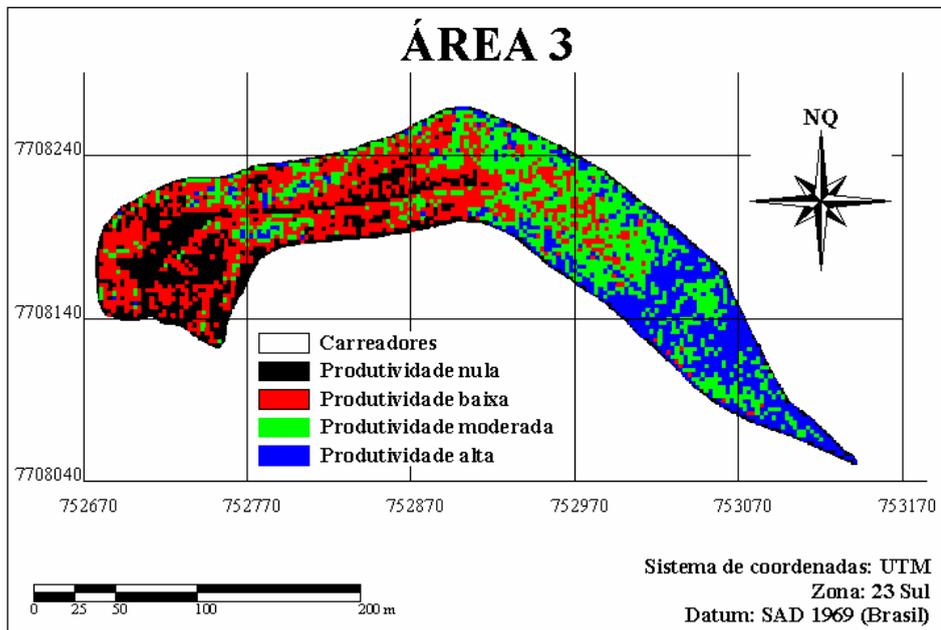


Figura 11. Mapa de produtividade estimada para a área 3.

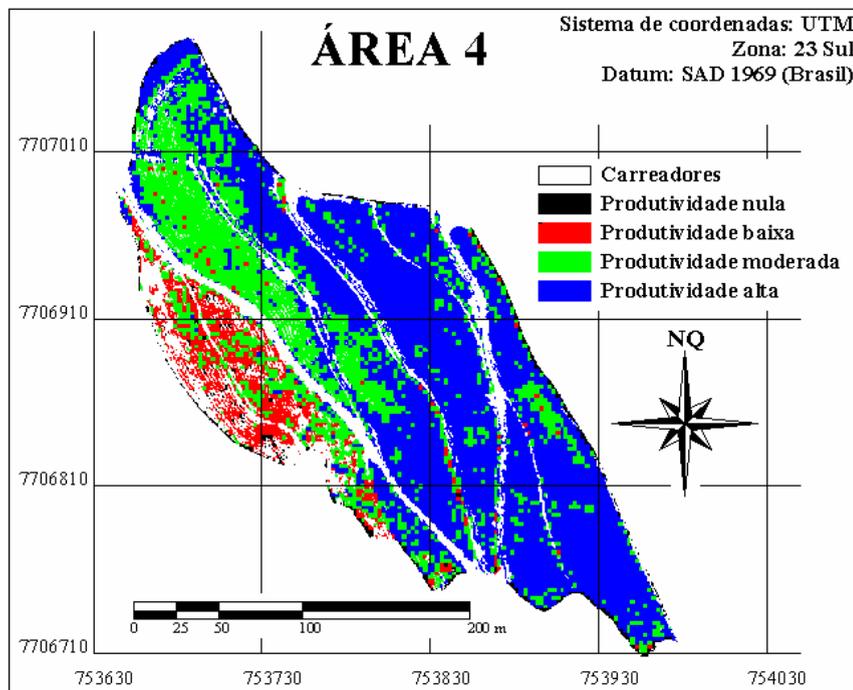


Figura 12. Mapa de produtividade estimada para a área 4.

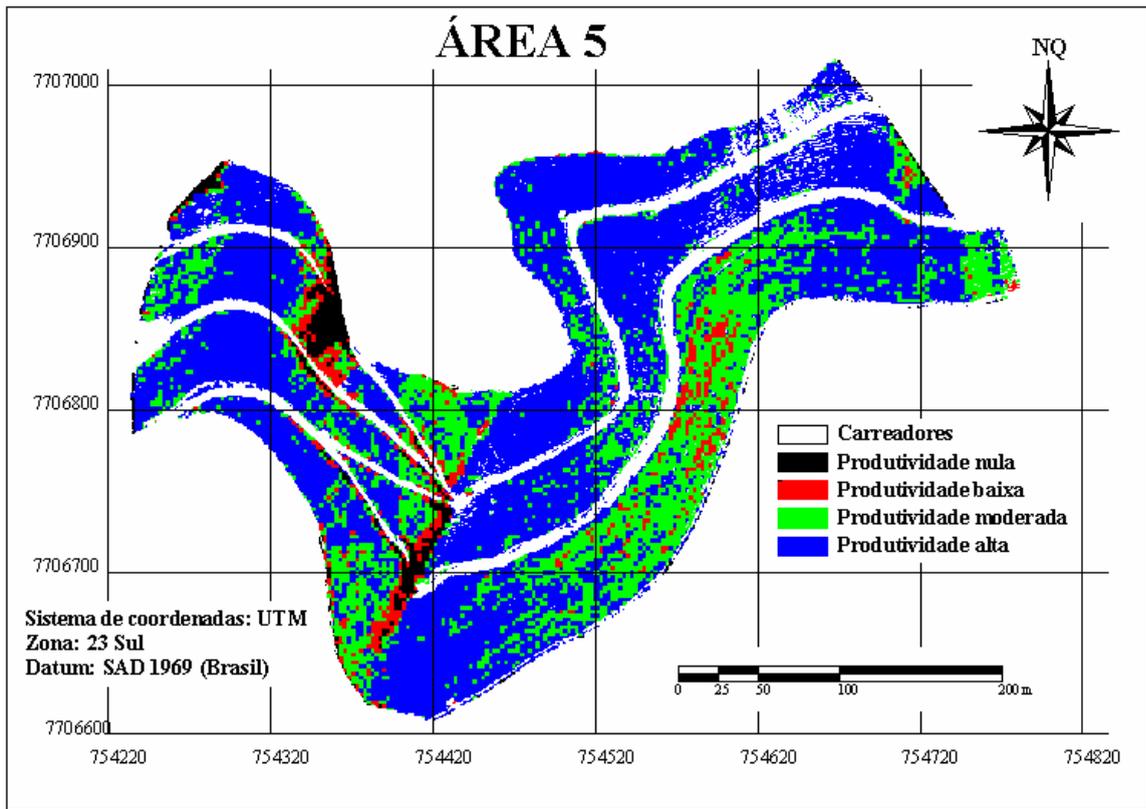


Figura 13. Mapa de produtividade estimada para a área 5.

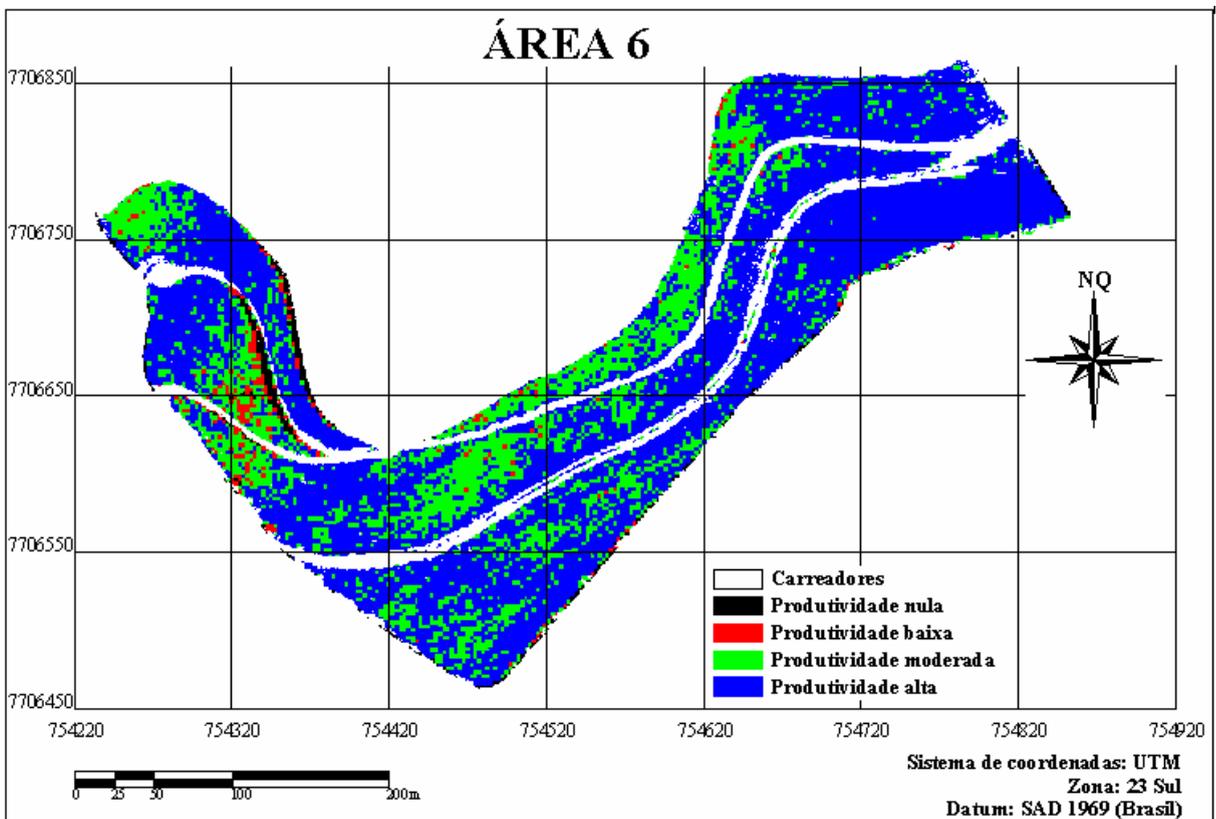


Figura 14. Mapa de produtividade estimada para a área 6.

Os mapas de produtividade foram elaborados, utilizando-se imagens de data mais próxima da colheita referente à safra 2002/2003. Assim, ao longo do período referente à safra em estudo, provavelmente, ocorreram vários fatores bióticos e abióticos, interferindo na estimativa da produtividade. Os mapas de produtividade são importantes ferramentas, pois, possibilitam ao produtor acessar e monitorar a atividade agrícola em nível local, aumentando a eficiência e os lucros com base no manejo diferenciado das áreas na cafeicultura.

Os valores de produtividade estimada pelo modelo e determinada na fazenda, bem como a diferença entre as médias das áreas do experimento, são apresentados na Tabela 7. Os valores da produtividade estimada foram calculados, considerando-se um rendimento de 50% na obtenção de café beneficiado a partir de café em coco, assim como os valores de produtividade, determinada na fazenda, foram fornecidos pelos proprietários. Na fazenda, os valores de produção em sacas de café beneficiado são obtidos dividindo-se o número de balaios de 60 litros de café úmido, colhidos em cada área, por oito.

Tabela 7. Valores de produtividade estimada pelo modelo e determinada na fazenda e a diferença entre as médias de produtividade das áreas do experimento

Área	Produtividade média estimada pelo modelo (sc.ha ⁻¹)	Produtividade média determinada pela fazenda (sc.ha ⁻¹)	Diferença entre médias de produtividade (sc.ha ⁻¹)
1	2,21	2,74	0,53
2	5,51	7,23	1,72
3	5,90	0,00	5,90
4	9,59	17,36	7,77
5	10,84	12,37	1,53
6	11,45	2,27	9,18
Média	7,58	7,00	4,44

Apesar das médias entre a produtividade estimada pelo modelo e na fazenda apresentarem-se próximas, a diferença entre esses valores variou de 0,53 a 9,18 sc.ha⁻¹ (Tab. 7). A área 6 apresentou maior diferença entre as médias de produtividade. Analisando-se os valores do índice de verde normalizado das subáreas da área 6, obtém-se um coeficiente de variação de 16,88%. Esta área apresentou maior coeficiente de variação para os valores de Vdn. Provavelmente, esta maior desuniformidade seja a causa da maior diferença absoluta entre os valores de produtividade.

As técnicas de sensoriamento remoto e o modelo desenvolvido mostraram-se promissores na identificação da variabilidade espacial da produtividade. Entretanto, deve-se levar em consideração outros fatores, tais como a idade e população de plantas do cafeeiro.

No presente trabalho, verificou-se alta variabilidade da produção entre as áreas na cafeicultura. Portanto, é interessante que, em trabalhos futuros, seja aumentado o número de repetições. Considerando que o experimento foi conduzido apenas, em uma única safra e que uma das características do cafeeiro é a sua bienalidade, torna-se indispensável a repetição do trabalho em outras safras, afim de melhor identificar e compreender a variabilidade espacial e temporal em áreas, na cafeicultura de montanha.

5. RESUMO E CONCLUSÕES

Neste trabalho, técnicas de processamento de imagens digitais e sensoriamento remoto foram implementadas e avaliadas para identificação da variabilidade espacial da produtividade na cafeicultura de montanha, utilizando-se imagens aéreas falsa-cor. As imagens foram processadas, utilizando-se oito índices espectrais: banda verde normalizada (Vdn); banda vermelho normalizada (Vmn); banda infravermelho normalizada (IVn); razão de vermelho e infravermelho (RVm); razão de verde e infravermelho (RVd); índice de vegetação da diferença normalizado (NDVI); índice de vegetação da diferença de verde normalizado (GNDVI); e índice de vegetação ajustador do solo (SAVI). As imagens foram obtidas nos dias nove de setembro e 27 de novembro de 2003, períodos antecedentes à colheita referente à safra 2003/2004.

Dentre os índices espectrais avaliados, apenas o índice Vdn em imagens aéreas falsa-cor satisfaz os critérios estabelecidos para seleção de índices, ou seja: interação área-época não-significativa e área e época significativas.

Imagens aéreas falsa-cor, obtidas no período mais próximo após a colheita da safra anterior, produziram um modelo de regressão com melhor ajuste para o estabelecimento da relação funcional entre produtividade e índice espectral Vdn.

A discriminação da variabilidade espacial da produtividade, a partir de índices espectrais, obtidos a partir de imagens aéreas falsa-cor, é possível. Entretanto, são necessários ajustes para corrigir os problemas, como diferenças entre estádios de maturação, infestação de plantas daninhas, assim como áreas com menores espaçamentos e nos cafeeiros mais antigos.

6. LITERATURA CITADA

ARAI, E.; RODRIGUEZ, A.C.M.; RUDORFF, B.F.T.; SHIMABUKURO Y.E.; MOREIRA M.A. Comparação dos índices de vegetação (NDVI) obtidos através de imagens AVHRR-NOAA e SeaWIFS-SEASTAR para os estados de São Paulo e Paraná. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 10.; 2001, **Anais...** Foz do Iguaçu: INPE, 2001. p. 11-13.

ARAÚJO, J.C.; MOLIN, J.P.; VETTORAZZI, C.A. Utilização de fotografias aéreas na previsão de produtividade. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 29., 2000, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: COMBEA, 2000. 3p.

ARAÚJO, J.C.; VETTORAZZI, C.A.; MOLIN, J.P. Determinação de zonas de manejo e estimativa da produtividade de culturas de grãos por meio de videografia aérea digital multiespectral. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGRICULTURA DE PRECISÃO, 2004, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: COMBAP, 2004. 18p.

BALASTREIRE, L.A.; AMARAL, J.R.; LEAL, J.C.G.; BAIO, F.H.R. Precision agriculture concepts applied to coffee crops. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE AGRICULTURA DE PRECISÃO, 2., 2002, Viçosa. **Anais...** Viçosa: SIAP, 2002. 1 CD.

BRASIL. Ministério da Agricultura e Reforma Agrária. **Regras para análises de sementes.** Brasília: CLAV/DNDV/SNAD/MA, 1992. 365p.

CAMARGO, M.B.P.; SANTOS, M.A.; PEDRO JUNIOR, M.J.; FAHL, J.I.; BRUNINI, O.; MEIRELES, E.J.L.; BARDIN, L. Modelo agrometeorológico de monitoramento e de estimativa de quebra de produtividade como subsídio à previsão de safra de café (*Coffea arabica* L.): Resultados preliminares. In: SIMPÓSIO DE PESQUISA DOS CAFÉS DO BRASIL E WORKSHOP INTERNACIONAL DE CAFÉ & SAÚDE, 3., 2003, Porto Seguro. **Anais...** Brasília, DF : Embrapa Café, 2003. p. 75-76.

CAPPELLI, N.L. **Agricultura Brasileira e o Fenômeno da Globalização.** Disponível em: <<http://www.gpsglobal.com.br/Artigos/Agricola/GlobalAgric.html>> Acesso em: 22 out. 2004.

CONAB (Compania Nacional de Abastecimento). **Safra 2004/2005, Segunda Previsão Abr/2004, Safra 2003/2004, Final.** Disponível em: < http://www.abic.com.br/arquivos/abic_prevconab2004_2.pdf > Acesso em: 20 out. 2004.

CREMONINI, L.C.M.; MOLIN, J.P. Acurácia de mapas altimétricos obtidos por monitores de produtividade. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE AGRICULTURA DE PRECISÃO, 2., 2002, Viçosa. **Anais...** Viçosa: SIAP, 2002. 1 CD.

DAAMEN, M.L.J.; ROCHA, J.V.; LAMPARELLI, R.A.C.; ZULLO JUNIOR, J. Mapeamento da variabilidade espacial da produção da cultura de cana-de-açúcar por meio de processamento digital de imagens de satélite e análise de componentes principais. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE AGRICULTURA DE PRECISÃO, 2., 2002, Viçosa. **Anais...** Viçosa: SIAP, 2002. 1 CD.

DAAMEN, M.L.J.; ROCHA, J.V.; LAMPARELLI, R.A.C.; ZULLO JUNIOR, J. Comparação entre estimativa de produção de cana-de-açúcar auxiliada por processamento digital de imagens de satélite e métodos tradicionais de observação de campo. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 11.; 2003, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: INPE, 2003. p. 47-49.

DALEZIOS, N. R.; DOMENIKIOTIS C.; LOUKAS A.; TZORTZIOS, S. T.; KALAITZIDIS C. **Cotton yield estimation based on NOAA/AVHkR produced NDVI**. In: Phys. Chem. Eurrh (B), Vol. 26, No. 3, p. 247-251,2001.

DAMATTA, F.M.; RENA, A.B. Ecofisiologia de cafezais sombreados e a pleno sol. In: ZAMBOLIM, LAÉRCIO (ed.). **O estado da arte de tecnologias na produção de café**. Viçosa : UFV, Departamento de Fitopatologia, 2002. c.3, p.93-136 : il.

EMMOTT, A.; HALL, J.; MATTHEWS, R. **Precision Farming Applied to Plantation Agriculture**, 1st European Conference on Precision Agriculture. 1997.

EIPHANIO, J.C.N.; GLERIANI, J.M.; FORMAGGIO, A.R.; RUDORFF, B.F.T. **Índices de vegetação no sensoriamento remoto da cultura do feijão**. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v.31, n.6, p.445-454, jun 1996.

EIPHANIO, J.C.N.; LEONARDI, L.; FORMAGGIO, A.R. **Relações entre parâmetros culturais e resposta espectral de cafezais**. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v.29, n.3, p. 439-447, 1994.

GOMES, F.P. **Curso de estatística experimental**. Piracicaba: ESALQ/USP, 1981, 430p.

GOPALAPILLAI, S.; TIAN L.F. **Spatial Yield Analysis and Modeling Using Aerial Cir Images**. ASAE paper 991151. ASAE, St. Joseph, MI, 1999.

GUIMARÃES, R.J.; MENDES, A.N.G.; SOUZA, C.A.S. **Cafeicultura**. Lavras: UFLA/FAEPE, 2002. 317p.

HAMADA, E.; PINTO, H.S.; ZULLO JÚNIOR, J. Avaliação da biomassa de trigo cultivar IAC-24 – Tucuruí utilizando radiometria de campo e imagens NOAA-AVHRR. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 11.; 2003, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: INPE, 2003. p. 117-122.

HOFFER, R.M. Biological and physical considerations in applying computer-aided analysis techniques to remote sensor data. In: SWAIN, P.H.; DAVIS, S.M. (ed.). 1978. **Remote Sensing: The Quantitative Approach**. New York, McGraw Hill. p.227-265.

HOFFMANN, R.; VIEIRA, S. **Análise de regressão – Uma Introdução a Econometria**. São Paulo: HUCITEC – EDU SP, 1977. 339p.

HURTADO, S.M.C; CARVALHO, L.M.T.; FERREIRA, E. Determinação das áreas cafeeiras através da análise multi -Temporal de imagens de satélite, de 1997 e 1999. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 11.; 2003, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: INPE, 2003. p.131-35.

KOLLER, M.; UPADHYAYA, S.K.; ROSA, U.A.; JOSIAH, M. **Applications of Remote Sensing in a Tomato Production System.** ASAE paper 991135. ASAE, St. Joseph, MI, 1999.

LARSCHEID, G.; BLACKMORE, B.S.; MOORE, M. **Management Decisions Based on Yield Maps.** 1st European Conference on Precision Agriculture. 1997.

LEAL, J.C.G. **Mapeamento da produtividade da colheita mecanizada do café.** 2002. 74p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

MACHADO, H. M.; LAMPARELLI, R. A.C.; ROCHA, J.V.; ZULLO JR., J.; PEREIRA, V. H. Utilização de dados orbitais (Landsat 7) e Sistema de Informações Geográficas (SIG) na estimativa do potencial de produção da cana-de-açúcar. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE AGRICULTURA DE PRECISÃO, 2., 2002, Viçosa. **Anais...** Viçosa: SIAP, 2002. 4p. 1 CD.

MAGALHÃES, A.C. Efeito da redução da superfície foliar sobre o desenvolvimento de cafeeiros. In: ROMERO, J.C.P. (ed.) **O Café no IAC: Instituto Agrônomo 60 Anos de Artigos Científicos Publicados na Revista Bragantina (1941 a 2001).** Piracicaba: Editora Agrônômica Ceres, 2002. p. 387–388.

MATLAB User's Guide, The Math Works Inc., 2000.

MOLIN, J.P. Geração e interpretação de mapas de produtividade para 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. (ed.). **Agricultura de Precisão.** Viçosa: UFV, 2000. p. 237-257.

MOREIRA, M.A.; ADAMI, M.; RUDORFF, B.F.T. Análise do comportamento espectral de café em imagens do TM e ETM+ do Landsat-5 e 7. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 11.; 2003, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: INPE, 2003. p.189-196.

OLIVEIRA, A.S.C. **Mapeamento da variabilidade espacial da produção da cafeicultura de montanha.** 2003. 82p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

PICINI, A.G. **Desenvolvimento e testes de modelos agrometeorológicos para a estimativa de produtividade do cafeeiro (*Coffea arabica L.*) a partir do monitoramento da disponibilidade hídrica no solo.** 1978. 132p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

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. (ed.). **Agricultura de Precisão**. Viçosa: UFV, 2000. p. 1-41.

QUEIROZ, D.M.; DIAS, G.P.; MANTOVANI, E.C. Automação e instrumentação para Agricultura de Precisão. In: Mecanização Agrícola e Agricultura de Precisão, XXVII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 1998.

RENA, A.B.; NACIF, A.P.; GONTIJO, P.T.G.; PEREIRA, A.A. Fisiologia do cafeeiro em plantios adensados. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL SOBRE CAFÉ ADENSADO, 1994, Londrina. **Anais...** Londrina: IAPAR, 1996. p. 71-85.

RENA, A.B.; NACIF, A.P.; GUIMARÃES, P.T.G.; Fenologia, produtividade e análise econômica do cafeeiro em cultivos com diferentes densidades de plantio e doses de fertilizantes. In: ZAMBOLIM, L. (ed.). **Produção integrada de café**. Viçosa : UFV, Departamento de Fitopatologia, 2003. 709p.

SARTORI, S.; FAVA, J.M.F.; DOMINGUES, E.L.; RIBEIRO FILHO, A.C.; SHIRAISSI, L.E. Mapping the Spatial Variability of Coffee Yield with Mechanical Harvester. In: ZAZUETA, F.S., XIN, J. (ed.). **Proceedings of the World Congress of Computers in Agriculture and Natural Resources**. Iguazu Falls, Brazil: ASAE Publication 701p0301., 2001. p. 196-205.

SAS Institute, 1999. **SAS OnlineDoc, Version 8**, SAS Institute Inc., Cary, NC, USA.

SCHIEBELBEIN, L. M.; FOCHT, D.; ROLOFF, G. Aumento de produtividade com o uso da agricultura de precisão ao longo do tempo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGRICULTURA DE PRECISÃO, 2004, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: COMBAP, 2004. 8p.

SEELAN, S.K.; LAGUETE, S.; CASADY, G.M.; SEIELSTAD, G.A. **Remote sensing applications for precision agriculture: A learning community approach**. Remote Sensing of Environment, n.88 p.157–169, 2003.

SEIELSTAD, G. **Remote Sensing Requirements for Agriculture**. Papers from the Workshop on Remote Sensing in Agriculture in the 21th Century, 1996.

SNEDECOR, G.W.; COCHRAN, W.G. **Statistical Methods**. Iowa State University Press. 8th edition 1989.503p.

SIMÕES, M.S.; ROCHA, J.V.; LAPARELLI, R.A.C. Análise do comportamento espectral de uma área comercial de cana-de-açúcar em duas safras por meio de radiometria de campo. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 11.; 2003, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: INPE, 2003. p. 2367-2374.

SOUZA, S.M.C. de. Tratamentos pós-colheita dos cafeeiros: uma prática essencial para a saúde das plantas. In: **Cafeicultura, a revista do cafeicultor**. Patrocínio, v.1, n.2, p. 25, jul. 2002.

SPRING versão 4.0 Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) Copyright© 2003.

STEEL, R.G.D.; TORRIE, J.H.; DICKEY, D.A. **Principles and Procedures of Statistics: A Biometric Approach**. McGraw Hill Series in Probability and Statistics. 3rd edition. 1997.666p.

VARELLA, C.A.A.; KHOURY JUNIOR, J.K.; PINTO, F.A.C.; FRANÇA, G.E. Estimativa da deficiência de nitrogênio na cultura do milho utilizando características de imagens digitais para uso em sensoriamento remoto. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 11.; 2003, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: INPE, 2003. p.2391-2398.

VIEIRA, R.G.C.; LACERDA, M.P.C.; ALVES, H.M.R. Imagens orbitais aplicadas ao levantamento da cultura do café em Minas Gerais. In: SIMPÓSIO DE PESQUISA DOS CAFÉS DO BRASIL, 1., Poços de Caldas. **Anais...** Poços de Caldas: Embrapa Café e Minasplan, 2000. p. 86-89.

VILELA, E.R. Secagem e Qualidade do Café. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 18, n. 187, p. 55-63, 1997.

WEILL, M. de A.M.; IAFFE, A.; ARRUDA, F.B.; SAKAI, E.; GRANJA, N. Variabilidade da produção de café em um ensaio em Pindorama, SP. In: SIMPÓSIO DE PESQUISA DOS CAFÉS DO BRASIL, 1., Poços de Caldas. **Anais...** Poços de Caldas: Embrapa Café e Minasplan, 2000. p. 779-781.

WOOTEN, J.R.; AKINS, D. C.; THOMASSON, J. A.; SHEARER, S. A.; PENNINGTON, D. A. **Satellite Imagery for Crop Stress and Yield Prediction: Cotton in Mississippi**. ASAE paper 991133. ASAE, St. Joseph, MI, 1999.

YANG, C.; EVERITT, J.H.; BRADFORD, J. M. **Airborne digital imagery and yield monitor data for identifying spatial plant growth and yield patterns**. ASAE paper 991134. ASAE, St. Joseph, MI, 1999.

YANG, C.; PRAHSER, S.O.; WHALEN, J. **In-Season Yield Prediction of Corn and Soybean with Hyperspectral Imagery**. ASAE paper 023139. ASAE, Chicago, Illinois, 2002.

APÊNDICES

Apêndice A

Valores médios calculados da massa (kg) de café verde, cereja, passa seco e impurezas de cada sub-área

Sub-área	Massa (kg)				Total
	Verde	Cereja	Passa Seco	Impurezas	
1	0,78	0,23	4,69	0,22	5,92
2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3	0,50	0,90	3,29	0,22	4,92
4	2,95	1,86	16,58	0,43	21,82
5	4,73	4,47	30,11	0,63	39,94
6	26,73	30,24	63,31	2,32	122,60
7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
11	119,99	90,56	231,46	9,41	451,42
12	107,31	90,99	230,51	8,40	437,20
13	45,36	429,29	114,68	10,21	599,54
14	10,54	219,05	35,50	6,67	271,76
15	32,38	465,25	123,66	11,85	633,14
16	2,75	3,24	33,52	0,54	40,04
17	0,28	0,51	10,52	0,21	11,52
18	2,03	2,15	51,92	1,16	57,26

Apêndice B

Valores máximos, mínimos, desvios padrões e médios calculados de umidade (%) de café verde, cereja e passa seco de cada sub-área

Sub-área	Umidade (%)		
	Verde	Cereja	Passa Seco
1	68,65	60,59	17,11
2	0,00	0,00	0,00
3	70,72	59,76	19,61
4	80,02	58,83	19,09
5	69,45	61,88	20,00
6	70,35	60,95	35,23
7	0,00	0,00	0,00
8	0,00	0,00	0,00
9	0,00	0,00	0,00
10	0,00	0,00	0,00
11	70,40	61,37	35,57
12	69,05	63,73	34,72
13	71,85	69,60	49,62
14	70,91	58,77	48,60
15	72,06	67,15	45,40
16	71,74	67,69	29,51
17	72,17	69,76	26,10
18	72,45	69,38	28,32
Máximo	80,02	69,76	49,62
Mínimo	68,65	58,77	17,11
Desvio Padrão	2,83	4,29	11,30

Apêndice C

Valores de percentagens dos estádios de maturação de cada sub-área

Área	Sub-área	Verde (%)	Cereja (%)	Passa Seco (%)
1	1	13,68	4,04	82,28
	2	-	-	-
	3	10,64	19,15	70,00
2	4	13,79	8,70	77,51
	5	12,03	11,37	76,60
	6	22,22	25,14	52,64
3	7	-	-	-
	8	-	-	-
	9	-	-	-
4	10	-	-	-
	11	27,15	20,49	52,37
	12	25,03	21,22	53,76
5	13	7,70	72,84	19,46
	14	3,98	82,63	13,39
	15	5,21	74,88	19,90
6	16	6,96	8,20	84,86
	17	2,48	4,51	93,02
	18	3,62	3,83	92,55

Apêndice D

Valores médios calculados das imagens-índices (Vdn, Vmn, IVn, RVm, RVd, NDVI, GNDVI e SAVI) das 18 subáreas com uso do software *MATLAB* para as imagens aéreas do dia nove de setembro de 2003

Subárea	VMn	VDn	IVn	RVm	RVd	NDVI	GNDVI	SAVI
1	0,2918	0,4218	0,2864	1,0613	1,5218	-0,0103	-0,1933	-0,0152
2	0,2982	0,4325	0,2693	1,1579	1,6547	-0,0493	-0,2347	-0,0732
3	0,3602	0,3602	0,2797	1,3771	1,3771	-0,1333	-0,1333	-0,1986
4	0,3265	0,4271	0,2464	1,4007	1,8191	-0,1422	-0,2714	-0,2122
5	0,3525	0,4017	0,2459	1,5904	1,7584	-0,1815	-0,2511	-0,2708
6	0,3303	0,4068	0,2629	1,3162	1,5978	-0,1145	-0,2189	-0,1707
7	0,2926	0,4285	0,2788	1,0806	1,5732	-0,0264	-0,2140	-0,0392
8	0,3012	0,3967	0,3021	1,0294	1,3461	-0,0009	-0,1385	-0,0014
9	0,2882	0,3801	0,3317	0,9059	1,1801	0,0674	-0,0722	0,1005
10	0,3617	0,3762	0,2621	1,4325	1,4739	-0,1610	-0,1832	-0,2400
11	0,2351	0,3547	0,4102	0,5913	0,8886	0,2673	0,0695	0,3983
12	0,2377	0,3451	0,4172	0,6081	0,8593	0,2704	0,0887	0,4030
13	0,2770	0,3860	0,3371	0,8797	1,1992	0,0932	-0,0747	0,1385
14	0,2204	0,3331	0,4464	0,5232	0,7798	0,3322	0,1393	0,4945
15	0,2783	0,3596	0,3622	0,8406	1,0488	0,1266	-0,0060	0,1885
16	0,2461	0,2461	0,5078	0,5090	0,5090	0,3404	0,3404	0,5068
17	0,2418	0,3402	0,4180	0,6185	0,8490	0,2621	0,0956	0,3905
18	0,2154	0,3296	0,4551	0,4942	0,7530	0,3517	0,1557	0,5237

Apêndice E

Valores médios calculados das imagens-índices (Vdn, Vmn, IVn, RVm, RVd, NDVI, GNDVI e SAVI) das 18 subáreas com uso do software MATLAB para as imagens aéreas do dia 27 de novembro de 2003

Subárea	VMn	Vdn	IVn	RVm	RVd	NDVI	GNDVI	SAVI
1	0,1914	0,3332	0,4754	0,4067	0,7058	0,4249	0,1750	0,6344
2	0,1759	0,3336	0,4905	0,3614	0,6840	0,4714	0,1898	0,7040
3	0,1609	0,3289	0,5101	0,3196	0,6494	0,5193	0,2149	0,7761
4	0,1772	0,3287	0,4942	0,3794	0,6864	0,4676	0,1962	0,6988
5	0,1687	0,3183	0,5130	0,3376	0,6289	0,5029	0,2319	0,7518
6	0,1743	0,3088	0,5168	0,3516	0,6094	0,4930	0,2484	0,7369
7	0,1820	0,3420	0,4760	0,3926	0,7313	0,4439	0,1613	0,6625
8	0,1700	0,3371	0,4928	0,3504	0,6909	0,4853	0,1862	0,7252
9	0,1761	0,3403	0,4835	0,3821	0,7162	0,4649	0,1705	0,6947
10	0,2083	0,3104	0,4813	0,4413	0,6550	0,3940	0,2141	0,5883
11	0,1405	0,2887	0,5708	0,2517	0,5167	0,6016	0,3262	0,8992
12	0,1429	0,2764	0,5808	0,2646	0,4919	0,6011	0,3503	0,8986
13	0,1636	0,3183	0,5182	0,3193	0,6192	0,5189	0,2380	0,7751
14	0,1580	0,2987	0,5434	0,2977	0,5573	0,5474	0,2885	0,8178
15	0,1756	0,3208	0,5036	0,3587	0,6479	0,4807	0,2195	0,7182
16	0,1385	0,2757	0,5857	0,2371	0,4716	0,6172	0,3597	0,9220
17	0,1576	0,3051	0,5373	0,2950	0,5701	0,5459	0,2752	0,8157
18	0,1368	0,2779	0,5853	0,2347	0,4761	0,6206	0,3558	0,9276

Apêndice F

Código-fonte da rotina implementada no MATLAB, para processamento das subáreas resultantes dos recortes das imagens falsa cor utilizando os índices banda verde normalizada, banda vermelho normalizada, banda infravermelho normalizada, razão de vermelho e infravermelho, razão de verde e infravermelho, índice de vegetação da diferença normalizado, índice de vegetação da diferença de verde normalizado e índice de vegetação ajustador do solo

```
% Calculo dos indices dos recortes
% VMn, VDn, IVn, RVm, RVd, NDVI, GNDVI e SAVI
% Colunas (recortes), linhas (indices)
```

```
clear; clc;
```

```
for a=1:18 % numero sub-areas
```

```
    I=strcat('R',num2str(a),'.tif');
```

```
    ima=imread(I);
```

```
    ni=nonzeros(double(ima(:,:,1)));
```

```
    r=nonzeros(double(ima(:,:,2)));
```

```
    g=nonzeros(double(ima(:,:,3)));
```

```
    VMn=(r./(ni+r+g));
```

```
    VDn=(g./(ni+r+g));
```

```
    IVn=(ni./(ni+r+g));
```

```
    RVm=(r./ni);
```

```
    RVd=(g./ni);
```

```
    NDVI=((ni-r)./(ni+r));
```

```
    GNDVI=((ni-g)./(ni+g));
```

```
    SAVI=((ni-r)./(ni+r+0.5))*1.5);
```

```
% Uso da media
```

```
    VMn=(mean(VMn));
```

```
    VDn=(mean(VDn));
```

```
    IVn=(mean(IVn));
```

```
    RVm=(mean(RVm));
```

```
    RVd=(mean(RVd));
```

```
    NDVI=(mean(NDVI));
```

```
    GNDVI=(mean(GNDVI));
```

```
    SAVI=(mean(SAVI));
```

```
% Colunas (recortes), linhas (indices)
```

```
    respa(1,a)=VMn;
```

```
    respa(2,a)=VDn;
```

```
    respa(3,a)=IVn;
```

```
    respa(4,a)=RVm;
```

```
    respa(5,a)=RVd;
```

```
    respa(6,a)=NDVI;
```

```
    respa(7,a)=GNDVI;
```

```
    respa(8,a)=SAVI;
```

```
end
```

```
wk1 write ('recortes_subareas.wk1',respa);
```

Apêndice G

Código-fonte da rotina implementada no MATLAB, para processamento das imagens utilizando o índice banda verde normalizado na geração de mapas de tendência de produtividade

```
% DIOGO SANTOS CAMPOS
% Algoritmo de processamento de produtividade
% VDn
clear; clc;

i=imread('imagem.tif');
ni=(double(i(:,:,1)));
r=(double(i(:,:,2)));
g=(double(i(:,:,3)));

bin=im2bw(i,1/255);
VDn=(g./(ni+r+g));

I1=VDn;
[li co z]=size(I1);
for linha=1:li;
    for coluna=1:co;
        x=I1(linha,coluna);
        if x<0.3053;
            x=0.3053;
        end
        if x>0.4118;
            x=0.4118;
        end
        I2(linha,coluna)=x;
    end
end

[li co z]=size(I2);
mat_ima=zeros(size(I2));
for linha=1:li/10; % tamanho bloco
    linf=linha*10; % tamanho bloco
    lini=linf-9; % tamanho bloco
    for coluna=1:co/10; % tamanho bloco
        colf=coluna*10; % tamanho bloco
        colli=colf-9; % tamanho bloco
        bloco=I2(lini:linf,colli:colf);
        x=mean(mean(bloco));
        imai=(-620432)*(x.^2)+(440476*(x))+(-76323); % Modelo Ajustado
        if imai<0;
            imai=0;
        end
        bloco_ps=bloco(:,:);
        bloco_ps(:,:)=imai;
        mat_ima(lini:linf,colli:colf)=bloco_ps;
    end
end

[li co z]=size(mat_ima);
mat0=zeros(size(mat_ima));
mat_c(:,:,1)=mat0(:,:);
```

```

mat_c(:,:,2)=mat0(:,:,);
mat_c(:,:,3)=mat0(:,:,);

for linha=1:li;
    for coluna=1:co;
        x=mat_ima(linha,coluna);
        if x>0 & x<=730; % Produtividade
            mat_c(linha,coluna,1)=255;
            mat_c(linha,coluna,2)=0;
            mat_c(linha,coluna,3)=0;
        end
        if x>630 & x<=1260; % Produtividade
            mat_c(linha,coluna,1)=0;
            mat_c(linha,coluna,2)=255;
            mat_c(linha,coluna,3)=0;
        end
        if x>1260 & x<=3000; % Produtividade
            mat_c(linha,coluna,1)=0;
            mat_c(linha,coluna,2)=0;
            mat_c(linha,coluna,3)=255;
        end
    end
end
end

% Separador de carregadores (limiar)

E=((r+g)./ni);
r=255; % Reescalando (0 255)
E=((E-min(min(E)))/(max(max(E))-(min(min(E)))))*r);
E1=uint8(E);

limiar=(mean(mean(impixel(E1))))/3;
disp 'Clicar nos carregadores e enter';

[li co z]=size(E1);
for linha=1:li;
    for coluna=1:co;
        x=E1(linha,coluna);
        if x>limiar; % Limiar
            x=0; % Carreadores e areas nao implantadas com a cultura
        elseif x<limiar; % Limiar
            x=255; % Areas implantadas com a cultura
        end
        E2(linha,coluna)=x;
    end
end

E3=im2bw(E2,1/255);
E4=bin.*E3;
nib=abs((double(E4)-1)).*255;

ima_proc(:,:,1)=nib+(mat_c(:,:,1));
ima_proc(:,:,2)=nib+(mat_c(:,:,2));
ima_proc(:,:,3)=nib+(mat_c(:,:,3));
figure; imshow(uint8(ima_proc));

% Producao
[li co z]=size(mat_ima);
mat0=zeros(size(mat_ima));
for linha=1:li;

```

```
for coluna=1:co;
    x=mat_ima(linha,coluna);
    if x>0 & x<=100000;
        mat00(linha,coluna)=x;
    end
end
end
prod=mat00;
carreadores=double(im2bw(E2));
produtividade=carreadores.*prod;
producao=sum(sum(produtividade.*0.000025))
```