

ANDERSON GOMIDE COSTA

**IDENTIFICAÇÃO DA MATURAÇÃO DE FRUTOS DA MACAÚBA POR MEIO  
DE CARACTERÍSTICAS ÓTICAS**

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

VIÇOSA  
MINAS GERAIS – BRASIL  
2015

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade  
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa**

T

C837i  
2015  
Costa, Anderson Gomide, 1985-  
Identificação da maturação de frutos da macaúba por meio  
de características óticas / Anderson Gomide Costa. – Viçosa,  
MG, 2015.  
xii,126f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

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

1. Macaúba. 2. Macaúba - Maturação. 3. Macaúba -  
Colheita. 4. Instrumentos ópticos. I. Universidade Federal de  
Viçosa. Departamento de Engenharia Agrícola. Programa de  
Pós-graduação em Engenharia Agrícola. II. Título.

CDD 22. ed. 633.851

ANDERSON GOMIDE COSTA

**IDENTIFICAÇÃO DA MATURAÇÃO DE FRUTOS DA MACAÚBA POR MEIO  
DE CARACTERÍSTICAS ÓTICAS**

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

APROVADA: 27 de novembro de 2015.

---

Domingos Sárvio Magalhães Valente

---

Nerilson Terra Santos

---

Domingos Sávio Queiroz

---

Carlos Alberto Alves Varella

---

Francisco de Assis de Carvalho Pinto  
(Orientador)

*A minha mãe Lucemar, ao meu pai Lúcio e a minha vó Glória que sempre colocaram os estudos meu e dos meus irmãos como prioridade e não mediram esforços durante toda a vida para que eu pudesse estudar.*

**DEDICO.**

*Quanto mais alto estejas,  
Mais apto a prestar.  
De quanto mais disponhas,  
Mais poder de servir.  
Quem possui mais cultura,  
Pode ensinar melhor.  
Não recuses doar  
Do que tenhas ou sejas.  
Virtude sem trabalho,  
Lembra riqueza morta.  
Recorda: Deus te dá,  
Para que também dês.*

*(Emmanuel)*

## AGRADECIMENTOS

Á Deus por sempre me guiar e mostrar os caminhos corretos a seguir, por me dar tranquilidade nos momentos conturbados e inteligência para superar os desafios que surgiram até aqui.

À minha avó Glória pelos cuidados, carinho e dedicação em todos esses anos.

Ao meu pai Lúcio e à minha mãe Lucemar pela dedicação e luta para que se tornasse possível o alcance de mais um objetivo da minha vida. Obrigado!

Aos meus irmãos, Otávio, Lucinho e Tamara, pela convivência e amizade.

Aos demais familiares, pela força, torcida e orações.

Ao professor Francisco pela confiança e paciência durante minha orientação, e por todos os ensinamentos que com certeza irão servir como diretrizes para minha carreira profissional e na vida pessoal.

Ao professor Roberto Braga, amigo de longa data e sempre um grande colaborador dos trabalhos por mim desenvolvido.

Ao professor Sérgio Motoike, por gentilmente aceitar participar como coorientador deste trabalho e ceder as instalações do laboratório de pós-colheita para análises deste experimento.

Aos demais professores do setor de mecanização agrícola que muito me acrescentaram tanto durante as disciplinas, quanto nas eventuais conversas extraclasse durante o período de doutorado.

Aos amigos da república Os largados, Cristiam, Alberes, Bruno, Luiz, Rafael, Túlio, Renata e demais agregados pela amizade e companheirismo e por tornar os anos em viçosa divertidos e prazerosos. Vão deixar saudade!

A Jardênia pela amizade, cumplicidade e por ser a parceira que sempre foi nos momentos bons e ruins!

A todos os amigos do laboratório de mecanização agrícola, por todas as ajudas, conversas no sofá, risadas e pelo convívio em todos esses anos. Valeu mesmo!

Aos amigos Eduardo Prado, Flora, Fred, Mateus, Remo e Emanuel, e os colegas estagiários Bruna, Thamiris, Laís, Karen, Iara e Marcelo que muito colaboraram para a realização deste trabalho.

Agradecimento especial ao técnico e colega Elimarcio, que muito me ajudou no laboratório de pós-colheita com as extrações de teor de óleo. Obrigado!

A Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, que sempre colaborou com

as minhas vindas a Viçosa para o término do doutorado. Agradeço especialmente aos amigos e colegas de trabalho, professores Murilo, Marcus, Paulinha, João e Varella.

Ao Programa de Pós-Graduação de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa e ao departamento de Engenharia por propiciar a oportunidade de realização do doutorado.

Ao CNPq pela concessão das bolsas durante o período de doutorado.

## **BIOGRAFIA**

ANDERSON GOMIDE COSTA, filho de Lúcio Fabiano da Costa e Lucemar Fátima Gomide, nasceu em Lavras, Minas Gerais, no dia 11 de julho de 1985.

Em agosto de 2005, ingressou no curso de Engenharia Agrícola pela Universidade Federal de Lavras, onde foi diplomado em dezembro de 2009.

Em março de 2010, ingressou no Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal de Lavras, na área de concentração máquinas e automação agrícola, obtendo o título de mestre em julho de 2011.

Em agosto de 2011, ingressou no Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa, em nível de doutorado, com concentração na área Mecanização Agrícola.

Atualmente é professor do quadro efetivo da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, vinculado ao Departamento de Engenharia, atuando na área de máquinas e mecanização agrícola.

## SUMÁRIO

<b>RESUMO</b> .....	ix
<b>ABSTRACT</b> .....	xi
<b>1. Capítulo 1 - Introdução geral</b> .....	01
1.1. Objetivos.....	07
1.2. Justificativa.....	08
1.3. Conteúdo do trabalho.....	08
1.4. Referências bibliográficas.....	09
<b>2. Capítulo 2 - Identificação da maturação de frutos de macaúba por meio do <i>biospeckle laser</i></b> .....	17
2.1. RESUMO.....	18
2.2. ABSTRACT.....	19
2.3. INTRODUÇÃO.....	20
2.4. MATERIAIS E MÉTODO.....	23
2.4.1. Local de coleta e padronização das amostras.....	23
2.4.2. Análise da atividade biológica por meio do <i>biospeckle laser</i> ..	24
2.4.3. Análise dos resultados.....	26
2.5. RESULTADO E DISCUSSÃO.....	27
2.5.1. Relação entre atividade biológica e estágio de maturação.....	28
2.5.2. Definição do ponto de colheita.....	30
2.6. CONCLUSÃO.....	32
2.7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	33
<b>3. Capítulo 3 - Relação entre atividade biológica mensurada pelo <i>biospeckle laser</i> e a firmeza da polpa de frutos de macaúba</b> .....	40
3.1. RESUMO.....	41
3.2. ABSTRACT.....	42
3.3. INTRODUÇÃO.....	43
3.4. MATERIAIS E MÉTODO.....	46
3.4.1. Local de coleta e padronização das amostras.....	46
3.4.2. Aquisição das imagens do <i>biospeckle laser</i> .....	47
3.4.3. Determinação da firmeza dos frutos e momentos de análise...	48
3.4.4. Análise dos dados.....	49
3.5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	50
3.5.1. Relação entre atividade biológica e firmeza dos frutos durante a maturação.....	50
3.5.2. Relação entre atividade biológica e firmeza após a maturação fisiológica.....	55
3.6. CONCLUSÃO.....	59
3.7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	59

<b>4. Capítulo 4 – Uso do <i>biospeckle laser</i> para determinação do ponto de colheita de frutos de macaúba.....</b>	<b>66</b>
4.1. RESUMO.....	67
4.2. ABSTRACT.....	67
4.3. INTRODUÇÃO.....	68
4.4. MATERIAIS E MÉTODO.....	71
4.4.1. Coleta dos frutos.....	71
4.4.2. Análise da atividade biológica por meio da técnica do <i>biospeckle laser</i> .....	72
4.4.3. Determinação do teor de óleo dos frutos.....	73
4.4.4. Análise do teor de óleo, atividade biológica e características físicas dos frutos.....	74
4.4.5. Classificação dos frutos para determinação do ponto de colheita em função da atividade biológica.....	74
4.5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	77
4.5.1. Análise do teor de óleo das semanas de maturação.....	77
4.5.2. Relação entre os parâmetros analisados.....	78
4.5.3. Determinação do ponto de colheita em função da atividade biológica.....	80
4.6. CONCLUSÃO.....	90
4.7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	90
<b>5. Capítulo 5 – Análise e classificação dos frutos de macaúba em diferentes estádios de maturação por meio de imagens digitais.....</b>	<b>96</b>
5.1. RESUMO.....	97
5.2. ABSTRACT.....	97
5.3. INTRODUÇÃO.....	98
5.4. MATERIAIS E MÉTODO.....	101
5.4.1. Local e aquisição das amostras.....	101
5.4.2. Aquisição e processamento das imagens.....	102
5.4.3. Determinação do teor de óleo dos frutos.....	105
5.4.4. Classificação dos frutos para determinação do ponto de colheita em função das propriedades colorimétricas.....	105
5.5.– RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	108
5.5.1. Relação entre teor de óleo e propriedades colorimétricas.....	108
5.5.2. Classificação dos frutos a partir da determinação do ponto de colheita em função das propriedades colorimétricas.....	110
5.6.– CONCLUSÃO.....	116
5.7.– REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	117
<b>6. Capítulo 6 – Conclusões gerais.....</b>	<b>124</b>

## RESUMO

COSTA, Anderson Gomide, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, novembro de 2015. **Identificação da maturação de frutos da macaúba por meio de características óticas.** Orientador: Francisco de Assis de Carvalho Pinto. Coorientadores: Roberto Alves Braga Júnior, Sérgio Yoshimitsu Motoike e Luis Manuel Navas Gracia.

A crescente demanda mundial pelo aumento da matriz energética priorizando o uso de fontes limpas e renováveis é um dos temas mais relevantes nas discussões políticas dos países em geral. Para o setor agroenergético brasileiro, a geração de conhecimento e tecnologias que contribuam para a produção sustentável de matéria-prima visando a produção de biocombustíveis é um dos principais desafios encontrados atualmente. Devido a políticas governamentais de incentivo para o uso de combustíveis produzidos a partir de óleos vegetais e a necessidade irreversível de fontes de energia sustentáveis, a utilização dos biocombustíveis vem sofrendo uma constante expansão em sua produção no Brasil. O uso de biocombustível no Brasil cresceu de 404 milhões de litros em 2007 para 2,92 bilhões de litros em 2013. Estima-se que a demanda por combustíveis a partir de óleos vegetais cresça até o ano de 2020 na ordem de 2,2% ao ano. Dentro deste contexto, a cultura da macaúba (*Acrocomia aculeata*) é considerada uma promissora matéria-prima para produção de biodiesel, devido às suas características positivas como a alta produtividade de óleo, a rusticidade, a ampla adaptabilidade em diferentes regiões, e a possibilidade de cultivo em sistemas agrossilvipastoris. Devido a não uniformidade na maturação dos frutos, a definição do momento de colheita é visto como uma questão a ser melhor compreendida para o cultivo em escala industrial, uma vez que a colheita no momento em que os frutos se apresentam em seu estágio de maturação fisiológica permite que se obtenha o óleo do fruto com a maior quantidade e qualidade. Desta forma, tecnologias que possam ser empregadas nas fases de colheita e processamento do fruto são essenciais para a criação de novas estratégias para o beneficiamento e extração do óleo com a máxima quantidade e qualidade, tornando a produção da cultura econômica viável e agregando valor e renda para produtor rural. Técnicas derivadas da instrumentação ótica vêm sendo aplicadas como ferramentas de análise em diversos processos, como na classificação e controle de qualidade, na avaliação de estágio de maturação e no monitoramento da senescência de frutos e vegetais. O objetivo deste trabalho foi

analisar as propriedades óticas dos frutos de macaúba de acordo com a época de maturação, correlacionando-as com o teor de óleo produzido no mesocarpo e determinar o momento de colheita dos frutos utilizando a técnica ótica do *biospeckle laser* e processamento de imagens digitais. Foram avaliados frutos em 10 semanas de maturação após a florada. A atividade biológica obtida por meio do *biospeckle laser* foi mensurada no epicarpo e no mesocarpo dos frutos, com o intuito de relacioná-la com o desenvolvimento dos frutos, o teor de óleo e a firmeza da polpa. As imagens digitais foram obtidas no epicarpo dos frutos com o intuito de relacionar as propriedades colorimétricas com o desenvolvimento dos frutos e o teor de óleo. Foram desenvolvidas classificadores por meio de redes neurais para discriminar frutos maduros, considerados aptos para a colheita. A atividade biológica e as propriedades colorimétricas classificaram os frutos como aptos para a colheita a partir da 59ª semana após a florada. O classificador utilizando o parâmetro matiz apresentou maior acurácia na classificação ao avaliar os frutos em todas as semanas analisadas, sendo o mais recomendado para determinar os frutos em ponto de colheita. Por estarem associadas ao estágio de maturação do fruto, tanto a atividade biológica mensurada pelo *biospeckle laser*, quanto as propriedades colorimétricas, podem ser utilizadas como um indicador da faixa de teor de óleo encontrada no fruto.

## ABSTRACT

COSTA, Anderson Gomide, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, November, 2015. **Identification of macaw palm fruits maturation stage through optical characteristics.** Advisor: Francisco de Assis de Carvalho Pinto. Co-advisors: Roberto Alves Braga Júnior, Sérgio Yoshimitsu Motoike and Luis Manuel Navas Gracia.

The growing worldwide demand for increased energy matrix prioritizing the use of clean and renewable sources is one of the most important issues in political discussions in many countries. For the Brazilian agro-energy sector, the generation of knowledge and technologies that contribute to sustainable production of raw-materials aimed at biofuel production is one of the main challenges today. Due to government incentive policies for the use of fuels produced from vegetable oils and the irreversible need for the use of sustainable energy sources, biofuel production has undergone a steady expansion in Brazil. The production of biofuels in Brazil grew from 404 million liters in 2007 to 2.92 billion liters in 2013. It is estimated that the demand for fuels derived from vegetable oils will grow until the year 2020 in the order of 2.2% per year. In this context, macaw palm (*Acrocomia aculeata*) is considered a promising raw-material for biodiesel production due to its positive characteristics such as high oil productivity, rusticity, wide adaptability in different regions and possibility of growing in agroforestry system. Due to the lack of uniformity in fruit maturation, the definition of the harvest point is regarded as an issue to be further understood for its cultivation on an industrial scale, since harvest of fruits at their physiological maturation allows extracting oil with higher quantity and quality. Thus, techniques that may be used during harvest and processing of fruits are essential for developing new strategies for processing and oil extraction with maximum quantity and quality, making culture production economically viable and adding value and income to farmers. Techniques derived from optical instrumentation have been applied as analytical tools in many processes, such as classification and quality control, evaluation of the maturation stage and monitoring of the senescence of fruits and vegetables. This study aimed to analyze the optical properties of macaw palm fruit at different maturation stages, correlate with the oil content in the mesocarp and determine the fruit harvest point using the biospeckle laser optical technique and processing of digital images. Biological activity obtained through biospeckle laser were measured in the epicarp and in the mesocarp,

in order to relate it with the fruit ripening, oil content and firmness. Digital images were obtained from epicarp in order to relate the colorimetric properties to the ripening of fruits and oil content. Classifiers were developed through neural networks for discriminating mature fruits considered suitable for harvest. Fruits were classified as suitable for harvesting from the 59<sup>th</sup> week after flowering, using biological activity and colorimetric properties as maturity indicators. The classifier using the hue as a maturation indicator, showed greater accuracy when evaluating the fruits at every week analyzed. considered the most recommended to determine harvest point. The biological activity, measured by laser biospeckle, and the colorimetric properties can be used as an indicator of oil content range due to the relationship with fruit ripening.

# **CAPÍTULO 1**

## **INTRODUÇÃO GERAL**

## 1. INTRODUÇÃO GERAL

Um dos principais desafios do setor agroenergético brasileiro atualmente se refere à necessidade de conhecimento e tecnologia que contribuam para a produção sustentável de matéria-prima visando à produção de biocombustível (LORENZI et al., 2011). A utilização compulsória dos biocombustíveis a partir de óleos vegetais vem gerando uma constante expansão na produção de biocombustível no Brasil, crescendo de 404 milhões de litros em 2007 (AMBROZIM et al., 2009) para 2,92 bilhões de litros em 2013 (ANP, 2014).

O aumento na produção do biodiesel deve-se, em grande parte, à criação de programas governamentais que estimulam a produção e a utilização do biocombustível. O Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel (PNPB) criado em 2004, por exemplo, aumentou significativamente a demanda para produção de óleo vegetal, impactando diretamente em culturas utilizadas para a produção de biocombustíveis, como o babaçu, o dendê e a canola (GARCEZ, 2008).

Na busca por novas culturas que possam contribuir para o aumento da matriz energética brasileira de forma sustentável, a cultura da macaúba (*Acronomia aculeata*) desponta como uma das promissoras culturas para produção de matéria prima de biocombustíveis devido principalmente a alta produtividade de óleo e a adaptabilidade a diversos biomas (PIMENTEL et al., 2011). A presença de ácido oleico acima de 80% no óleo do mesocarpo dos frutos da macaúba concede características importantes para a produção de biocombustíveis devido a sua maior estabilidade a oxidação e operabilidade em baixas temperaturas (CICONINI, 2012).

Além do setor energético, o óleo do mesocarpo tem grande aplicabilidade no setor alimentício, sendo que o óleo da amêndoa do fruto é utilizado no setor farmacêutico e de cosmético enquanto o endocarpo é utilizado no setor siderúrgico como carvão vegetal (HIANE et al., 2005. BOAS et al., 2010; MOOZ et al., 2012).

A macaúba (Figura 1.1) é uma palmeira nativa de florestas tropicais, sendo encontrada de maneira expressiva em Minas Gerais, Goiás, Mato Grosso do Sul, Mato Grosso, Piauí, Tocantins e Ceará (LORENZI et al., 2011). Em geral, a ocorrência da macaúba se dá em áreas de solos férteis e com vegetação primitiva, evitando extremos de deficiência de nutrientes e água, sendo assim considerada uma espécie pioneira em regiões de exploração extrativista (MOTTA et al., 2002). A espécie *Acronomia*

*aculeata* é considerada uma palmeira robusta podendo chegar até 15 metros de altura. O caule cilíndrico varia entre 25 a 50 cm de diâmetro podendo apresentar acúleos nas bainhas. As folhas são verde-escuras, com 3 a 5 metros de comprimento e aculeadas. Os frutos, formados após a maturação completa da inflorescência, são esféricos ou levemente achatados com diâmetro variando em média de 2,5 a 5 cm disposto em cachos (MOTTE et al., 2002; SOUZA, 2013).



**Figura 1.1.** Área de macaúba em condições naturais.

O fruto é considerado a parte mais relevante economicamente da planta devido aos altos teores de óleo armazenado em suas partes. O epicarpo (casca) é fortemente aderido ao mesocarpo quando o fruto está imaturo, sendo facilmente rompido em estádios próximos da maturação completa. O mesocarpo (polpa) é fibroso, de sabor adocicado, comestível, rico em glicerídeos, de coloração amarelo-esbranquiçado. O endocarpo é aderido a polpa, envolvendo a amêndoa oleaginosa. Os frutos são formados por cerca de 20% de epicarpo, 40% de mesocarpo, 33% de endocarpo e 7% de amêndoa (MONTROYA, 2011).

Quanto ao óleo encontrado nos frutos, o mesocarpo apresenta o maior teor podendo chegar a 70% do total de óleo extraído do fruto, seguido da amêndoa, que apresenta teor de óleo variando entre 46 % a 58 %, sendo que o epicarpo possui o menor valor, em torno de 10 %.

Da amêndoa se extrai um óleo de coloração clara com teores de ácidos graxos saturados variando entre 71,2 % a 84,6 %, predominando o ácido láurico que varia entre 39 % a 59 % do total dos teores de ácidos graxos saturados. O óleo do mesocarpo apresenta coloração laranja intensa conferida pela presença de carotenoides e predominância de ácidos graxos insaturados, dentre eles, os mais abundantes são o ácido oleico, o palmítico e o linoleico, correspondendo a aproximadamente 80 % a 95 % dos ácidos totais (HIANE et al., 2005; DZISIAK, 2004). O  $\beta$ -caroteno representa de 80 a 90% dos carotenoides totais encontrados no mesocarpo de macaúba (RAMOS et al., 2008).

A macaúba apresenta uma produtividade de óleo entre 2,00 a 4,50 t.ha<sup>-1</sup>, enquanto que a mamona e a soja, oleaginosas tradicionais na exploração para biocombustíveis, apresentam um produtividade média de 0,60 t.ha<sup>-1</sup> e 0,45 t.ha<sup>-1</sup>, respectivamente (ROSCOE et al., 2007). A produtividade de óleo da macaúba é comparada com a produtividade do dendê, que apresenta cerca de 4,0 t.ha<sup>-1</sup> (AGRIANUAL, 2012).

A quantidade e qualidade do óleo da macaúba está diretamente ligada ao ponto de colheita dos frutos (RAMOS et al., 2008; MONTROYA, 2013; MATSIMBE et al., 2015). O ciclo da cultura ocorre durante todo ano, sendo que a maturação fisiológica dos frutos é atingida de setembro a janeiro.

Por ser submetida a uma exploração extrativista, a macaúba apresenta algumas características que limitam sua implementação em um sistema de produção em escala industrial, como a sazonalidade e maturação irregular dos frutos (MOTOIKE, 2013). Devido à variação no nível de maturação dos frutos entre árvores e até entre cachos, na colheita de macaúba obtém-se frutos maduros, semimaduros e imaturos, resultando em menor quantidade e qualidade de óleo (CLEMENT et al., 2005). A colheita é realizada pelo recolhimento dos frutos já caídos no chão, uma vez que o desprendimento dos frutos é o principal método de determinação do ponto de colheita atualmente. Os frutos em contato com o solo degradam rapidamente devido ao alto teor de água presente na polpa, favorecendo a contaminação microbiana, o que resulta na elevação da acidez do óleo e consequente perda quantitativa e qualitativa do óleo

produzido (HIANE et al., 2005; TILAHUN et al., 2013).

Queiroz et al., (2015) demonstrou que o contato do fruto com o solo provoca o desenvolvimento de leveduras, fungos e bactérias no epicarpo e no mesocarpo mesmo quando lavados com água e imersos a uma solução de hipoclorito de sódio.

Além do sistema de colheita ainda pouco evoluído, a análise e extração do óleo é realizada aplicando tecnologias adaptadas de outras oleaginosas. Estudos sobre a determinação do ponto colheita dos frutos antes do contato com o chão ainda são escassos, no entanto, são necessários para elaboração de critérios de padronização que visem a viabilidade econômica e a manutenção da qualidade do óleo.

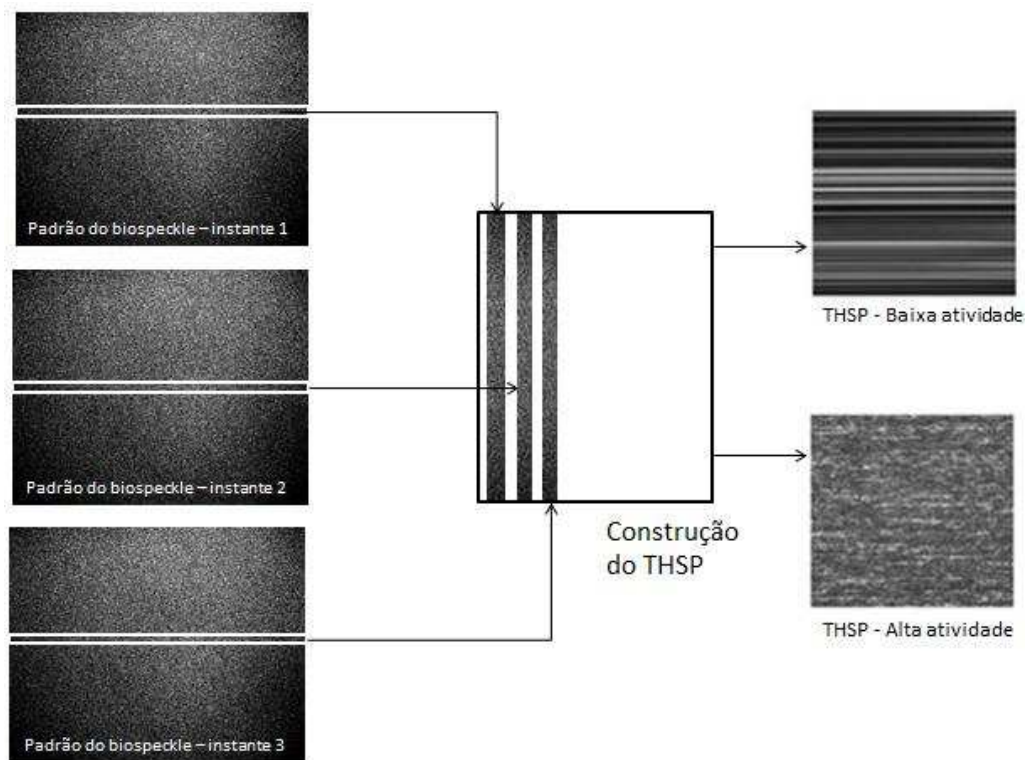
Em busca de alternativas, Souza (2013), desenvolveu uma metodologia para reter os frutos de macaúba que se depreenderam naturalmente do cacho em um sistema coletor composto por redes, impedindo o contato direto com o solo. Os frutos puderam ficar retidos em campo sem o contato direto com o solo durante 11 dias sem o comprometimento da qualidade do óleo da polpa. Outras técnicas que possam ser empregadas nas fases de colheita e pós-colheita do fruto e novas estratégias para o beneficiamento do fruto se fazem necessárias para a implantação de um sistema de colheita eficiente que permita a extração do óleo de maior qualidade possível.

Técnicas derivadas da instrumentação ótica vêm sendo aplicadas como alternativas de monitoramento em diversos processos, principalmente em processos de seleção de vegetais. A utilização de sistemas de visão artificial, a partir de câmeras digitais, com a finalidade de classificar frutos de palmáceas de acordo com a intensidade da cor do fruto, vem sendo estudada por diversos autores (TAN et al., 2010; HUDZARI et al., 2010; ABDULLAH et al., 2002; BALASUNDRAM et al., 2006; RAZALI et al., 2008). A utilização de outros métodos provenientes de técnicas óticas, para classificação e controle de qualidade de frutos e vegetais, como o uso de dados espectrais de refletância (JUNKWON et al., 2009; SAAED et al., 2012), avaliação por tomografia e raios-x (ABDULLAH et al., 2004; EMBRAPA, 2008), utilização de sensores fluorescentes para a determinação da maturação de uva (CEROVIC et al., 2008; HAZIR et al., 2012) e o uso do *biospeckle laser* para quantificação e monitoramento da atividade biológica em frutos e vegetais (ANSARI et al., 2012; ZDUNEK et al., 2014) também são encontrados com frequência em trabalhos científicos.

A técnica conhecida como *biospeckle laser* baseia-se em um fenômeno ótico de interferência que ocorre quando um feixe de luz coerente incide sobre uma

superfície de um material onde há ocorrência de uma atividade de origem biológica (RABAL e BRAGA, 2008). Observado ao longo do tempo, os padrões sucessivos do *biospeckle* tornam-se passíveis de monitoramento e estão diretamente associados à atividade biológica existente no material biológico analisado.

Uma análise do padrão temporal e espacial das imagens do *biospeckle* ao longo do tempo permite verificar a intensidade de atividade mensurada, conforme demonstrado na Figura 1.2. Este padrão conhecido como *Time History Speckle Pattern* (THSP) é construído a partir de pixels da mesma linha obtidas das imagens do *biospeckle* em instantes sucessivos. Assim, uma dimensão do THSP corresponde a distribuição espacial dos pixels dos padrões de *biopseckle*, enquanto a outra, corresponde à variação de intensidade dos pixels ao longo do tempo (OULAMARA et al., 1989). Padrões que apresentam pequenas variações na intensidade dos pixels são associados a fenômenos de baixa atividade, enquanto que padrões com grandes variações nas intensidades dos pixels são associados a fenômenos de alta atividade.



**Figura 1.2.** Análise temporal e espacial do grau de atividade dos padrões do *biospeckle*.

Por ser dinâmico, o *biospeckle* deve ser analisado por meio de técnicas de processamento de imagem e tratamento estatístico, uma vez que a observação visual

permite apenas a identificação da existência do fenômeno, que se assemelha a um fervilhamento, mas não permite quantificá-lo (RABAL et al., 1998). Métodos de análise gráfica como de Fujji et al. (1985) e o método das diferenças generalizadas (ARIZAGA et al., 2002) permitem a geração de mapas de intensidade da atividade biológica mensurada, definindo regiões de atividades distintas na imagem. Estes métodos são comumente aplicáveis em estudos envolvendo a qualidade de frutos e vegetais (BRAGA et al., 2003; PAJUELO et al., 2003; ROMERO et al., 2009; COSTA, 2011; VEGAS E TORRES, 2013)

Já os métodos de quantificação numérica da atividade do *biospeckle*, autocorrelação (XU et al., 1995), momento de inércia (ARIZAGA et al., 1999) e diferenças dos valores absolutos (CARDOSO e BRAGA, 2014) são utilizados na avaliação do estágio de maturação de frutos e vegetais (CHARGOT et al., 2012; ANSARI e NIRALA, 2013) no monitoramento da perda de qualidade de frutos e vegetais em condições distintas de armazenamento (ENES et al., 2012; KURENDA et al., 2012), no monitoramento do tempo de vida de prateleira de alimentos minimamente processados (ALVES et al., 2013) e na correlação com atributos bioquímicos de alimentos (ZDUNEK e HERPPICH, 2012; LORENTE et al., 2013; KURENDA et al. 2014).

Sendo assim, a necessidade de estudos que possibilitem um controle mais rigoroso na colheita da cultura da macaúba, associado ao grande potencial da aplicação de técnicas provenientes de instrumentação ótica, se apresenta como uma área promissora para o desenvolvimento de pesquisas visando a classificação e controle de qualidade de frutos de macaúba.

### **1.1. Objetivos**

Analisar as propriedades óticas dos frutos de macaúba de acordo com a maturação, correlacionando-as com o teor de óleo produzido no mesocarpo e determinar o ponto de colheita dos frutos utilizando a técnica ótica do *biospeckle laser* e processamento de imagens digitais.

Para isso, os seguintes objetivos específicos foram:

- Avaliar o potencial do *biospeckle laser* para monitorar a atividade biológica de frutos de macaúba em diferentes semanas de maturação, definindo uma relação que permita caracterizar o ponto para colheita do fruto.
- Analisar a relação entre a atividade biológica mensurada pelo *biospeckle*

*laser* e a firmeza da polpa em diferentes semanas de maturação.

- Desenvolver um sistema de classificação supervisionada que permita determinar o ponto de colheita dos frutos de macaúba em função da atividade biológica mensurada a partir de uma imagem padrão do *biospeckle* obtida no epicarpo do fruto.
- Desenvolver um sistema de classificação supervisionada que permita determinar o ponto de colheita dos frutos de macaúba em função das propriedades colorimétricas obtidas por meio de imagens digitais.
- Relacionar a atividade biológica e as propriedades colorimétricas com teores de óleo dos frutos de macaúba obtidos em diferentes semanas de maturação.

## **1.2. Justificativa**

Como a exploração da macaúba ainda ocorre de forma extrativista, as características inerentes à cultura, como a maturação irregular dos frutos, são vistas como fatores limitantes para o cultivo racional e a produção em escala industrial. O conhecimento do ponto de colheita é de fundamental importância para que o fruto seja colhido com a maior quantidade e qualidade de óleo possível, além de permitir que sistemas de colheita eficientes sejam implantados na cadeia produtiva da cultura.

A mensuração de atributos físicos e químicos de culturas por meio de técnicas e sensores óticos vem tornando-se uma importante ferramenta de auxílio na busca por maior eficiência nos processos de produção agrícolas. As principais vantagens destas técnicas são a alta precisão, a facilidade de aquisição de dados e a não necessidade de destruição do produto avaliado.

Visto que a automação de processos agrícolas usando a visão artificial de máquinas demonstra ser um campo promissor para pesquisa, a classificação do fruto de macaúba de acordo com seu grau de maturação, por meio da aplicação de técnicas provenientes de instrumentos óticos, permitirá correlacionar as características óticas dos frutos com diferentes estádios de maturação, sendo um parâmetro indicativo do ponto de colheita e conseqüente qualidade e quantidade de óleo.

## **1.3. Conteúdo do Trabalho**

Esta tese é uma exigência por parte do programa de pós-graduação em Engenharia Agrícola para obtenção do título de *Doctor Scientiae*. A estrutura do trabalho foi disposta em capítulos no formato de artigo científico, onde foram

abordados temas específicos referentes ao trabalho.

No presente capítulo, denominado Capítulo 1, foi apresentado uma introdução geral, onde foi abordada toda a problemática envolvendo o tema, apresentando estudos e informações relevantes e dando suporte teórico para o entendimento das técnicas e análises contidas no trabalho. O capítulo ainda contou com o tópico de objetivos, onde foi apresentado os objetivos gerais e específicos do trabalho e a justificativa do trabalho.

O Capítulo 2 consiste na avaliação do potencial do *biospeckle laser* para monitorar a atividade biológica de frutos de macaúba em diferentes semanas de maturação, definindo uma relação para caracterizar o momento para a colheita do fruto.

No Capítulo 3, é realizada uma análise da relação entre a atividade biológica mensurada pelo *biospeckle laser* e a firmeza no mesocarpo dos frutos de macaúba, visto que a firmeza é um dos principais parâmetros utilizados para avaliação do estágio de maturação de frutos e vegetais.

O Capítulo 4 avalia a relação entre a atividade biológica medida pelo *biospeckle laser* no epicarpo do fruto de macaúba e o teor de óleo contido no mesocarpo dos frutos de macaúba. Também é apresentado um sistema de classificação baseado em redes neurais visando determinar o momento de colheita dos frutos em função da atividade biológica.

No Capítulo 5, é apresentado um classificador desenvolvido por redes neurais com o objetivo de determinar o momento de colheita dos frutos em função de propriedades colorimétricas obtidas a partir de imagens digitais. As propriedades colorimétricas foram associadas ao teor de óleo dos frutos em diferentes estágios de maturação.

O Capítulo 6, último capítulo da tese, apresenta um resumo das conclusões obtidas nesta pesquisa.

#### **1.4. Referências Bibliográficas**

ABDULLAH, M. Z.; GUAN, L. C.; LIM, K. C.; KARIM, A. A. The applications of computer vision system and tomographic radar imaging for assessing physical properties of food. **Journal of Food Engineering**. v.61, 125–135p., 2004.

- AGRIANUAL. **Biocombustível**. p. 25 – 29, 2012.
- ALVES, J. A.; BRAGA, R. A.; VILAS BOAS, E. V. de B. Identification of respiration rate and water activity change in fresh-cut carrots using biospeckle laser and frequency approach. **Postharvest Biology and Technology**, v. 86, p. 381-386, 2013.
- ANSARI, Z.; MINZ, P. D.; NIRALA, A. K. Fruit quality evaluation using biospeckle techniques. In: **Recent Advances in Information Technology (RAIT), 2012 1st International Conference on. IEEE**, p. 873-876, 2012.
- ANSARI, M. D.; NIRALA, A. K. Biospeckle activity measurement of Indian fruits using the methods of cross-correlation and inertia moments. **International Journal for Light and Electron Optics**, v. 124, n. 15, p. 2180-2186, 2013.
- ARGANDOÑA, S. E. J.; CHUBA, C. A. M. Caracterização biométrica, física e química de frutos da palmeira bociuva *Acrocomia aculeata (Jacq) Lodd*. **Revista Brasileira Fruticultura**, v.33, p.1023-1028,2011.
- ARIZAGA, R.; TRIVI, M.; RABAL, H. Speckle time evolution characterization by the cooccurrence matrix analysis. **Optics and Laser Technology**, v. 31, n. 2, p. 163-169, 1999.
- ARIZAGA, R.; CAP, N. L.; RABAL, H.; TRIVI, M. Display of local activity using dynamical speckle patterns. **Optical Engineering**, v. 41, p. 287-294, 2002.
- AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (ANP). Anuário estatístico brasileiro do petróleo, gás natural e biocombustíveis: 2014. Ministério de Minas e Energia. **Boletim Eletrônico**, p.252, 2014.
- AMBROZIM, A. R. P.; KURI, S. E.; MONTEIRO, M. R. Corrosão metálica associada ao uso de combustíveis minerais e biocombustíveis. **Química Nova**, v.32, p.1910-1916, 2009.
- BALASUNDRAM, S. K.; ROBERT, P.C.; MULLA, D. J. Relationship between oil content and fruit surface color in oil palm (*Elaeis guineensis Jacq.*).**Journal of Plant Sciences**, v.3, p.217-227, 2006.

BOAS, M. A. V., CARNEIRO, A. C. O., VITAL, B. R., CARVALHO, A. M. M. L., MARTINS, M. A. Efeito da temperatura de carbonização e dos resíduos de macaúba na produção de carvão vegetal. **Science Forum**, 38, 481-490, 2010.

BRAGA, R. A.; FABBRO, I. M. DAL; BOREM, F. M.; RABELO, G.; ARIZAGA, R.; RABAL, H. J., TRIVI, M. Assessment of Seed Viability by Laser Speckle Techniques. **Biosystems Engineering**, v. 86, p. 287–294, 2003.

CARDOSO, R. R.; COSTA, A. G.; NOBRE, C. M. B.; BRAGA, R. A.. Frequency signature of water activity by biospeckle laser. **Optics Communications**, Amsterdam, v. 284, n. 8, p. 2131-2136, 2011.

CARDOSO, R. R.; BRAGA, R. A. Enhancement of the robustness on dynamic speckle laser numerical analysis. **Optics and Lasers in Engineering**, v. 63, p. 19-24, 2014.

CHARGOT, M. S.; ADAMIÁK, A.; ZDUNEK, A. Pre-harvest monitoring of apple fruits development with the use of biospeckle method. **Scientia Horticulturae**, v.145, p.23-28, 2012.

CEROVIC, Z. G.; MOISE, N.; AGATI, G.; LATOUCHE, G.; GHOZLEN, N. B.; MEYER, S. New portable optical sensors for the assessment of winegrape phenolic maturity based on berry fluorescence. **Journal of Food Composition and Analysis**, v.21, p.650– 654, 2008.

CICONINI, G; FAVARO, S. P.; ROSCOE, R.; MIRANDA, C. H. B.; TAPETI, C. F.; MIYAHIRA, M. A. M.; BEARARI, L.; GALVANI, F.; BORSATO, A. V.; CONALGO, L. A.; NAKA, M.H. Biometry and oil contents of *Acrocomia aculeata* fruits from the Cerrados and Pantanal biomes in Mato Grosso do Sul, Brazil. **Industrial Crops and Products**, v.45, p. 208– 214, 2013.

CLEMENT, C. R.; PÉREZ, E. L.; LEEUWEN, J. O potencial das palmeiras tropicais no Brasil: acertos e fracassos das últimas décadas. **Agrociência**. v.9, n.1/2, p.67-71, 2005.

COSTA, A. G. Predição e identificação de danos internos em batatas por meio do biospeckle laser. Dissertação. Universidade Federal de Lavras. Lavras-MG, 81p. 2011.

DZISIAK, D. New oils reduce saturated and trans fats in processed foods. **Cereal Foods World**, v. 333, p.49:331, 2004.

EMBRAPA AGROENERGIA. Visão estratégica do uso de palmáceas para bioenergia e ações de pesquisa, desenvolvimento e inovação. **EMBRAPA**. Brasília, p.6, 2008.

ENES, A. M., FRACAROLI, J. A., DAL FABBRO, I. M., RODRIGUES SILVESTRE. Biospeckle supported fruit bruise detection. World Academy of Science, **Engineering and Technology**, v. 70, 2012.

FUJII, H.; ASAKURA, T.; NOHIRA, K.; SHINTOMI, Y.; OHURA, T. Blood flow observed by time varying laser speckle. **Optics Letters**, v. 10, p. 104–106, 1985.

GARCEZ, C.A G. Uma análise da política pública do Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel (PNPB). **Dissertação**. Centro de Desenvolvimento Sustentável, Universidade Federal de Brasília. Brasília/DF. 171p, 2008.

HAZIR, M. H. M.;SHARIFF, A. R. M.; AMIRUDDIN, M. D.; RAMLI, A. R.; SARIPAN, M. I. Oil palm bunch ripeness classification using fluorescence technique. **Journal of Food Engineering**, v.113, p. 534–540, 2012.

HENDERSON, A.; GALEANO, G.; BERNAL, R. Field guide to the palms of the Americas, **Princeton University**, p.166 – 167, 1995.

HIANE P. A., Ramos Filho M. M., Ramos M. I. L., Macedo M. L. R. Bocaiuva, *Acrocomia aculeata (Jacq.) Lodd.*, Pulp and Kernel Oils; characterization and Fatty acid Composition. Braz. **Journal Food and Technology**. v.8, p.256-259, 2005.

HUDZARI, R. M.; ISHAK, W .I. W.; Noorman, M. M. Parameter Acceptance of software Development for oil palm fruit maturity prediction. **Journal of software Enginnering**. v.4, n.3, 244-256p. 2010.

JUNKWON, P.; TAKIGAWA, T.; OKAMOTO, H.; HASEGAWA, H.; KOIKE, M.; SAKAI, K.; BAHALAYODHIN, B. Potential application of color and hyperspectral images for estimation of weight and ripeness of oil palm (*Elaeis guineensis Jacq. var. tenera*). **Agricultural Information Research**. v.18, n.2, 72–81p. 2009.

KURENDA, A., ADAMIAK, A., ZDUNEK, A. Temperature effect on apple

biospeckle activity evaluated with different indices. **Postharvest Biology and Technology**, v.67, p. 118-123, 2012.

KURENDA, A.; ZDUNEK, A.; SCHLÜTER, O.; HERPPICH, W. B. VIS/NIR spectroscopy, chlorophyll fluorescence, biospeckle and backscattering to evaluate changes in apples subjected to hydrostatic pressures. **Postharvest Biology and Technology**, v. 96, p. 88-98, 2014.

LORENTE, D.; ZUDE, M.; REGEN; C.; PALOU, L.; GÓMEZ-SANCHIS, J.; BLASCO, J. Early decay detection in citrus fruit using laser-light backscattering imaging. **Postharvest Biology and Technology**, v. 86, p. 424-430, 2013.

LOPES, J. S.; ANDRADE, T. C. Q.; SANTANA, G. C. Biodiesel: oportunidades e desafios. **Comunicação Bahia Agrícola**, v. 8, n. 1, p. 24 – 27, 2007.

LORENZI, G. M. A. C.; PIMENTEL, L. D.; DE PAULA, S. R.; NEGRELLE, R. R. B.; PAES, J. M. V. Prospecção da cadeia produtiva dos frutos da palmeira macaúba no estado de Minas Gerais. **Informe Agropecuário- EPAMIG**. Belo horizonte. v.32, n.265, p.41-51, 2011.

MATSIMBE, S. F. S.;MONTIKE, S. Y.; PINTO, F. A.C.; LEITE, H. G.; MARCATTI, G. H. Prediction of oil content in the mesocarp of fruit from the macauba palm using spectrometry1. **Revista Ciência Agronômica**, v. 46, n. 1, p. 21-28, 2015.

MONTOYA, S.G. Caracterização do desenvolvimento do fruto da palmeira macaúba. **Dissertação**. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, MG, p.51, 2013.

MOTA, C. S.; CORRÊA, T. R.; GROSSI, J. A. S.; CASTRICINI, A; RIBEIRO, A. S. Exploração sustentável da macaúba para produção de biodiesel: colheita, pós-colheita e qualidade dos frutos. **Informe Agropecuário EPAMIG**. Belo horizonte, v.32, n.265, p.41-51, 2011.

MOTOIKE, S. J.; CARVALHO, M.; PIMENTEL, L. D.; KUKI, K. N.; PAES, J. M. V.; DIAS, H. C. T.; SATO, A. Y. A cultura da macaúba: implantação e manejo de cultivos racionais. **Editores UFV**. Viçosa, Minas Gerais, p.61, 2013.

MOTTA, P. E. F.; NILTON, C.; OLIVEIRA-FILHO, A. T.; GOMES, J. B. V.

Ocorrência de macaúba em Minas Gerais: relação com atributos climáticos, pedológicos e vegetacionais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. v. 37, p. 1023-1031, 2002.

OULOMARA, G.; TRIBILLON, J.; DUVERNOY, J. Biological activity measurements on botanical specimen surfaces using a temporal de correlation effect of laser speckle. **Journal of Moderns Optics**, v. 36, n. 2, p. 136-179, Feb. 1989.

PAJUELO, M.; BALDWIN, G.; RABAL, H.; CAP, N.; ARIZAGA, R.; TRIVI, M. Bio-speckle assessment of bruising in fruits. **Optics and Lasers in Engineering**, v. 40, p. 13–24, 2003.

PIMENTEL, L. D.; DIAS, L. A. S.; PAES, J. M. V.; SATO, A. Y.; MONTOIKE, S. Y. Recomendação de adubação e calagem para o cultivo de macaúba: 1º aproximação. **Informe Agropecuário-EPAMIG**. Belo Horizonte, v.32, n.265, p.20-30, 2011.

QUEIROZ, L.; NASCIMENTO, C.; SANTOS, V.; CREN, E.; ANDRADE, M. Avaliação dos microrganismos presentes nos frutos da macaúba (*Acrocomia Aculeata*) após diferentes tratamentos pós-colheita. **Blucher Chemical Engineering Proceedings**, v. 1, n. 2, p. 4595-4602, 2015.

RABAL, H. J.; ARIZAGA, R.; TRIVI, M. R.; ROMERO, G. G.; ALANIS, E. Transient phenomena analysis using dynamic speckle patterns. **Optical Engineering**, v. 35, n.1, p. 57-63, 1995.

RABAL, H. J., et al. Transient phenomena analysis using dynamic speckle patterns. **Optical Engineering**, Virginia, v. 35, p. 57-62, 1998.

RABAL, H. J.; BRAGA, R. A. Dynamic laser speckle and applications. **Boca Raton: CRC**. p.304, 2008.

RABELO; G. F.; BRAGA, R. A.; FABBRO, I. M. D.; TRIVI, M. R.; RABAL H. J.; ARIZAGA, R. Laser speckle techniques in quality evaluation of Orange fruits. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 9, n. 4, p. 570-575, 2005.

RAZALI, M. H.; ISMAIL, W.; ISHAK, W.; RAMLI, A.; SULAIMAN, M., Modeling

of oil palm fruit maturity for the development of an outdoor vision system. **International Journal of Food Engineering**. .v.4, n.3, 2008.

RAMOS, M. I. L.; RAMOS FILHO, M. M.; HIANE. P. A.; BRAGA NETO. J. A.; SIQUEIRA. E. M. A. S. Qualidade nutricional da polpa de bociúva *Acrocomia aculeata* (Jacq.) Lodd. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v.28, p. 90 – 94, 2008.

ROMERO G.G., MARTINEZ C.C., ALANIS E.E., SALAZAR G.A., BROGLIA V.G., ALVAREZ L. Biospeckle activity applied to the assessment of tomato fruit ripening. **Biosystems Engineering**, v.9 p.103-116, 2009

ROSCOE, R.; RICHETTI, A.; MARANHO, E. Análise de viabilidade técnica de oleaginosas para produção de biodiesel em Mato Grosso do Sul. **Revista Política Agrícola**, v.16, p.48-59, 2007.

SAEED, O. M. B.; SANKARAN, S.; SHARIFF, A. R. M.; SHAFRI, H. Z. M.; EHSANI, R.; ALFATNI, M. S.; HAZIR, M. H. M. Classification of oil palm fresh fruit bunches based on their maturity using portable four-band sensor system. **Computers and Electronics in Agriculture**. v.82, p.5560, 2012.

SOUZA, C.T.F. Desenvolvimento, maturação e sistemas de colheita de frutos da macaúba (*Acrocomia aculeata*). **Dissertação**. Universidade Católica Dom Bosco. Campo Grande, MS. p.75, 2013.

TAN, Y. A.; LOW, K. W.; LEE, C. K.; LOW, K. S., Imaging technique for quantification of oil palm fruit ripeness and oil content. **European Journal of Lipid Science and Technology**. v.112, n.8, p. 838-843. 2010.

TILAHUN, W. W.; GROSSI, J. A. S.; FAVARO, S. P.; PIMENTEL, L. D. Pós-colheita de frutos de macaúba em ambiente com temperatura controlada: efeito sobre a água na polpa. **Congresso brasileiro de macaúba**, 1, 2013, Patos de Minas, MG. Consolidação da cadeia produtiva: anais. Brasília, DF: MAPA, 2013.

VEGA, F.; TORRES, M. C. Automatic detection of bruises in fruit using Biospeckle techniques. **In: Image, Signal Processing, and Artificial Vision (STSIVA), 2013 XVIII Symposium of. IEEE**, p.1-5, 2013.

ZDUNEK, A., HERPPICH, W. B. Relation of biospeckle activity with chlorophyll content in apples. **Postharvest Biology and Technology**, v.64, n.1, p. 58-63, 2012.

ZDUNEK, A.; ADAMIAK, A.; PIECZYWEK, P. M.; KURNDA, A. The biospeckle method for the investigation of agricultural crops: A review. **Optics and Lasers in Engineering**, v. 52, p. 276-285, 2014.

## **CAPÍTULO 2**

### **IDENTIFICAÇÃO DA MATURAÇÃO DE FRUTOS DE MACAÚBA POR MEIO DO BIOSPECKLE LASER**

## 2. IDENTIFICAÇÃO DA MATURAÇÃO DE FRUTOS DE MACAÚBA POR MEIO DO BIOSPECKLE LASER

### 2.1. RESUMO

A macaúba está inserida no grupo de culturas promissoras para produção de biocombustíveis devido à alta produtividade de óleo nos frutos com a qualidade adequada para este fim, sendo que os elevados teores de óleo estão associados ao ponto de maturação ideal para a sua colheita. Devido a maturação não uniforme dos frutos, durante a colheita, os cachos são obtidos em diferentes estádios de maturação o que resulta em perda da quantidade e qualidade de óleo. Uma vez que há ainda uma lacuna nos estudos sobre sistemas de colheita e a extração do óleo de macaúba é realizada aplicando tecnologias adaptadas de outras oleaginosas, a geração de tecnológicas específicas para cultura é fundamental. Estudos apontam que a atividade biológica de frutos mensurada pela técnica ótica conhecida como *biospeckle laser* está associado a atributos físico-químicos que variam de acordo com grau de maturação dos frutos. O objetivo deste trabalho foi avaliar o potencial do *biospeckle laser* para monitorar a atividade biológica de frutos de macaúba em diferentes semanas de maturação, definindo uma relação para caracterizar o momento para a colheita do fruto. Foram avaliados frutos em 10 semanas de maturação após a florada dos frutos. As imagens do padrão do *biospeckle laser* foram obtidas a partir da iluminação no epicarpo de cada fruto. A atividade biológica foi quantificada por meio do algoritmo da diferença dos valores absolutos aplicada aos padrões do *biospeckle*. A atividade biológica apresentou uma relação linear significativa ( $R^2 = 0,913$ ) com as semanas de maturação após a florada dos frutos. A análise de agrupamento das médias da atividade biológica em cada semana avaliada permitiu concluir que a partir 59ª semanas após a florada os frutos estão próximos a maturação fisiológica e considerados aptos para colheita.

**Palavras-chaves:** Atividade biológica; Sensores óticos; Momento para colheita.

## 2.2. ABSTRACT

### IDENTIFICATION OF THE MATURATION STAGES OF MACAW PALM FRUITS THROUGH LASER BIOSPECKLE

Macaw palm belongs to the group of promising crops for biofuel production due to its high oil productivity in fruits of adequate quality for this purpose, and the high oil content are associated with the ideal maturation stage for harvest. Due to the lack of uniformity in fruit maturation during harvest, bunches are obtained at different maturation stages, resulting in reduced oil quantity and quality. Since there is still a gap in studies of crop systems and macaw palm oil extraction accomplished by applying technologies adapted from other oilseeds, the generation of technologies specific to this culture is essential. Studies have shown that the biological activity of fruits measured by optical technique known as biospeckle laser is associated with physicochemical properties that vary according to maturation stage of fruits. The aim of this study was to evaluate the potential of biospeckle laser to monitor the biological activity of macaw palm fruits at different maturation weeks, defining a relationship that allows characterizing the ideal point to harvest the fruit. Fruits were evaluated at 10 weeks maturation after flowering fruits. The biospeckle laser standard image was obtained from illuminating the epicarp of each fruit. The biological activity was quantified by absolute value difference algorithm applied to biospeckle patterns. Biological activity has a significant linear relationship ( $R^2 = 0.913$ ) with weeks maturation after flowering fruits. Cluster analysis of the mean biological activity evaluated in each week concluded that from 59th weeks after flowering fruits are close to physiological maturity and considered suitable for harvest.

**Keywords:** Biological activity; Optical sensors; Harvest moment.

### 2.3. INTRODUÇÃO

A macaúba (*Acrocomia aculeata*) é uma palmeira nativa de florestas tropicais, encontrada com grande abundância nos estados de Minas Gerais, Goiás, Mato Grosso do Sul, Mato Grosso, Piauí, Tocantins e Ceará (HENDERSON et al., 1995; LORENZI et al., 2011), sendo considerada uma cultura promissora como matéria-prima para produção de biodiesel, devido principalmente a alta produtividade de óleo, podendo atingir entre 2 a 4,5 ton.ha<sup>-1</sup> (ROSCOE et al., 2007). Apesar do grande potencial para a produção do biodiesel, a macaúba apresenta algumas características que dificultam sua exploração em um sistema de produção em larga escala, como a sazonalidade e maturação irregular dos frutos.

Em geral, frutos colhidos imaturos apresentam perda de água e são suscetíveis a desordens fisiológicas que afetam o aroma, sabor e aparência em função das alterações na coloração, textura, concentração de açúcares e compostos ácidos e fenólicos. Já frutos colhidos após o ponto de maturação fisiológica entram rapidamente em senescência (MANICA et al., 2000).

A determinação da maturação fisiológica de frutos é essencial para que a colheita seja realizada no momento certo (ANZONINI et al., 2004), sendo um fator determinante para o manejo adequado na pós-colheita que irá permitir que o produto apresente-se com a melhor qualidade possível, seja para consumo ou para outros fins (FARIAS et al., 2011; CHITARRA et al., 2005). No caso da macaúba, a colheita realizada em épocas diferentes do ponto de maturação fisiológica acarreta na perda quantitativa e qualitativa de óleo, limitando o aproveitamento industrial dos produtos gerados (SOUZA, 2013).

Atualmente, o momento da colheita da macaúba é determinada a partir do desprendimento natural dos frutos de seus cachos. O contato com solo permite o desenvolvimento de microorganismos na polpa e na casca dos frutos, acarretando em um aumento na acidez do óleo (QUEIROZ et al., 2015). Em palmáceas, como a macaúba, o conhecimento do estágio de maturação fisiológico dos frutos é um fator crítico na determinação da qualidade e do teor do óleo produzido (HIANE et al., 2005; ANDRADE et al., 2006).

Para a determinação da maturação fisiológica dos frutos, são utilizados vários métodos que levam em conta as características físicas e químicas de cada produto

(KLUGE et al., 2010; PINTO et al., 2013). Os métodos de mensuração direta, apesar da confiabilidade nas análises, apresentam desvantagens, como a deterioração da amostra, além de serem processos muitas vezes demorados em níveis laboratoriais e de custos elevados (CHITARRA e CHITARRA, 2005; MACIEL et al., 2010; SANTOS et al., 2013).

A mensuração indireta aparecem como uma alternativa para minimizar estas desvantagens. Vários métodos não invasivos com o objetivo de mensurar a qualidade de frutos e vegetais vêm sendo aplicados à tecnologia de pós-colheita. A mensuração de atributos ligados à maturação e qualidade de produtos agrícolas por técnicas não destrutivas vêm se tornando uma importante ferramenta para a indústria alimentícia (RAJKUMAR et al., 2012; LIEW e LAU, 2012; IAGNAT et al., 2013).

Trabalhos baseados na instrumentação óptica são amplamente aplicados na mensuração das propriedades físicas e químicas de produtos agrícolas (ELMASRY et al., 2007; BOBELYN et al., 2010; BETEMPS et al., 2011). Este tipo de instrumentação pode ser utilizado para classificar produtos com base na variedade, na maturação, na qualidade de produtos agrícola e contaminações por doenças. As principais vantagens destas técnicas são a alta precisão, a produção de resultados consistentes e a não necessidade de destruição do produto avaliado (CHEN e SUN, 1991; BUTZ et al., 2005).

Saeed et al. (2012), utilizaram respostas espectrais a partir da refletância na região do infravermelho próximo para a construção de um sensor que permitiu a classificação dos frutos da palmácea quanto ao estágio de maturação relacionando com o teor de óleo dos frutos.

Matsimbe et al. (2015) desenvolveram um modelo para predição do teor de óleo por meio de informações hiperespectrais obtidas no mesocarpo dos frutos de macaúba em diferentes estádios de maturação.

Outros estudos utilizando sistemas de visão artificial vêm sendo aplicados para classificar frutos de palmáceas de acordo com as características espectrais a partir de câmeras digitais (ABDULLAH et al., 2004; TAN et al., 2010) e sensores fluorescentes (CEROVIC et al., 2008; HAZIR et al., 2012).

A técnica conhecida como *biospeckle laser* baseia-se em um fenômeno ótico de interferência que ocorre quando um feixe de luz coerente incide sobre uma superfície de um material onde há ocorrência de uma atividade de origem biológica (RABAL e BRAGA, 2008). Observado ao longo do tempo, os padrões sucessivos do

*biospeckle* tornam-se passíveis de monitoramento, sendo que a mudança ao longo do tempo dos padrões do *biospeckle* pode estar diretamente associada com a atividade biológica existente no material analisado. A correlação entre a atividade biológica de um material e o grau de variação do padrão de *biospeckle* ao longo do tempo pode ser observada em diversos trabalhos ligados a agricultura (PAJUELO et al., 2003; COSTA, 2011; CARDOSO et al., 2011; BRAGA et al., 2012).

Por ser dinâmico, o *biospeckle* deve ser analisado por meio de técnicas de processamento de imagem e tratamento estatístico, uma vez que a observação visual permite apenas a identificação da existência do fenômeno, mas não permite quantificá-lo (RABAL et al., 1998). Um dos principais métodos de análise do *biospeckle* baseia-se na quantificação da dispersão dos pontos em torno da diagonal de uma matriz de co-ocorrência por meio do cálculo do momento de inércia IM (ARIZAGA, 1999) e da média dos valores absolutos AVD (BRAGA et al., 2014).

A aplicação da técnica do *biospeckle laser* na determinação de estádios de maturação de frutos tem sido encontrada em diversos estudos (ROMERO et al., 2009; NASSIF et al., 2012; ANSARI e NIRALA, 2013).

A atividade biológica mensurada pelo *biospeckle* está associada as alterações metabólicas ocorridas durante a maturação de frutos e vegetais (RABELO et al., 2005; ALVES et al. 2013; ZDUNEK et al., 2014). Zudnek e Nerppich (2012) investigaram a relação entre a técnica do *biospeckle* e o movimento celular em maçãs, uma vez que, como a propagação da luz e por consequência a atividade do *biospeckle* é afetada pela presença do pigmento fotossintético, foram avaliadas interações entre atividade biológica e o teor de clorofila em duas cultivares de maçãs. Ao comparar a atividade do *biospeckle* com a fluorescência da clorofila, observou-se uma correlação negativa para ambos cultivares. A partir desta relação foi evidenciado que a diminuição linear do teor de clorofila resultou no aumento da atividade do *biospeckle*.

Os objetivos deste estudo foram avaliar o potencial da técnica do *biospeckle laser* para monitorar a atividade biológica de frutos de macaúba e relacioná-las com as diferentes semanas de maturação, buscando caracterizar o momento para a colheita da macaúba.

## 2.4. MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.4.1. Local de coleta e padronização das amostras

Os frutos utilizados no experimento foram coletados na área experimental localizada no município de Acaiaca, situado na Zona da Mata Mineira a 20° 23' 33'' de latitude Sul e 47° 07' 31'' de longitude Oeste, com altitude média de 601 m. A área foi composta por plantas adultas de macaúba, da espécie *Acrocomia aculeata* com mais de 10 anos, em estágio reprodutivo, sendo desenvolvidas de forma extrativista, sem fins comerciais e sem nenhum tratamento prévio do solo.

Para a coleta dos frutos, foram escolhidas plantas que apresentavam aspecto físico saudável, sem doenças visíveis e sem ataque de pragas ou predadores. Durante o início do florescimento, 20 cachos foram selecionados de forma aleatória em 20 árvores diferentes.

Foram realizadas 10 coletas de frutos no período entre a 40ª e a 61ª semana após a florada (SAF), período compreendido entre Setembro de 2013 à Fevereiro de 2014. Em cada coleta foram obtidos 100 frutos, sendo o universo amostral composto de cinco frutos por cacho. Os frutos foram coletados de forma aleatória sem levar em conta a posição dos mesmos dentro de cada cacho.

Uma vez que a maturação dos frutos ocorre de forma mais acelerada nas semanas finais da época de maturação, as coletas foram realizadas em intervalos os quais sofreram redução progressiva a medida em que os frutos se aproximavam da maturação fisiológica. Assim, entre a primeira a terceira coleta deu-se um intervalo de quatro semanas. Entre a terceira e a oitava coleta deu-se um intervalo de duas semanas. Por fim, entre a oitava e décima semana deu-se um intervalo de uma semana.

A redução no número de frutos em cachos específicos provocado por intempéries naturais, o abortamento de alguns cachos durante o período do experimento (após a 57ª SAF), fato inerente a cultura quando próximos da maturação fisiológica e questões eventuais referentes a condução do experimento influenciaram no número total de amostras coletadas.

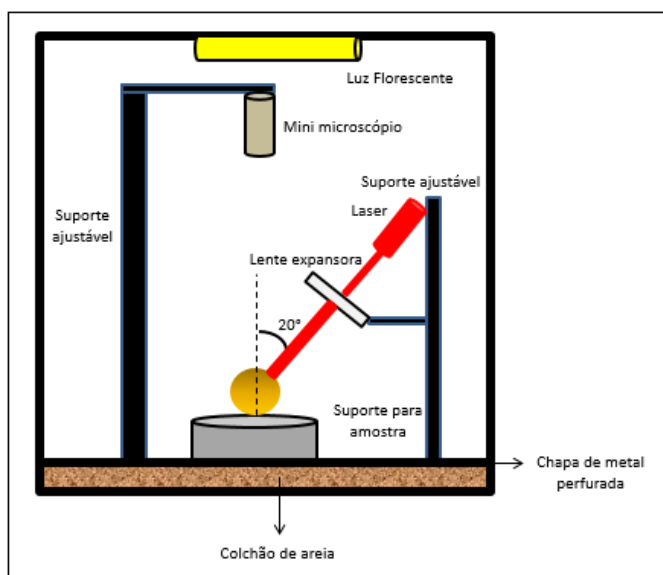
Os frutos foram coletados manualmente e separados em sacos plásticos de acordo com o cacho a qual foram retirados. Após a coleta, os frutos foram transportados até o laboratório onde foram lavados e analisados.

#### 2.4.2. Análise da atividade biológica por meio do *biospeckle laser*

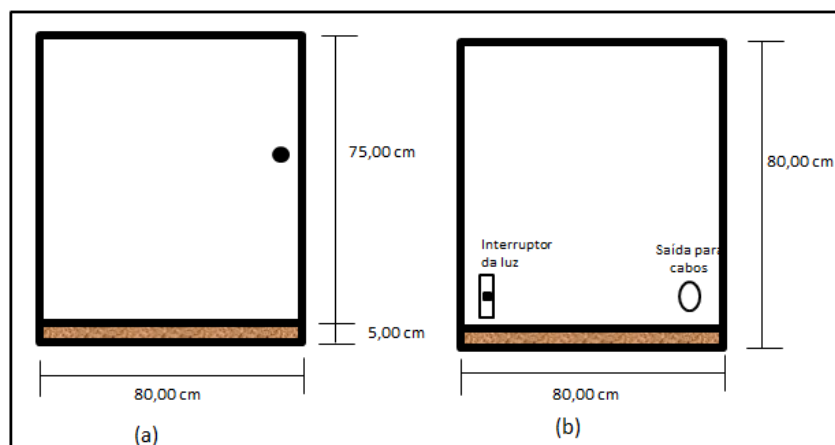
Para a análise da atividade biológica por meio do *biospeckle laser*, foi construída uma unidade para a aquisição e análise das imagens provenientes da técnica do *biospeckle laser*. Por ser uma estrutura menor do que às unidades tradicionais e não fixa, deu-se o nome de Unidade experimental.

A Unidade experimental foi constituída de um microscópio portátil de alta resolução com câmera para a coleta das imagens, ligado diretamente a entrada USB de um computador, um laser de He-Ne de 50mW de potência e um jogo de lentes e filtros redutores de intensidade. O laser foi posicionado a uma altura de 15 cm da amostra com uma inclinação de aproximadamente  $60^\circ$  em relação à amostra. O microscópio foi posicionado a 25 cm de altura da posição das amostras com uma inclinação de  $20^\circ$  em relação à amostra de modo que a região iluminada do fruto fosse visualizada pela câmera, gerando assim o padrão do *biospeckle* a ser analisado.

O software *Speckle Tools* (GODINHO et al., 2012) foi utilizado para realizar a aquisição das imagens coletadas pelo microscópio portátil. A Unidade Experimental foi mantida dentro de uma câmara de madeira de 80 cm x 80 cm revestida internamente com placas de poliestireno da cor branca para isolamento acústico. Na Figura 2.1 e na Figura 2.2 está esquematizada a disposição dos elementos constituintes da Unidade experimental.



**Figura 2.1.** Vista da área interna da Unidade Experimental

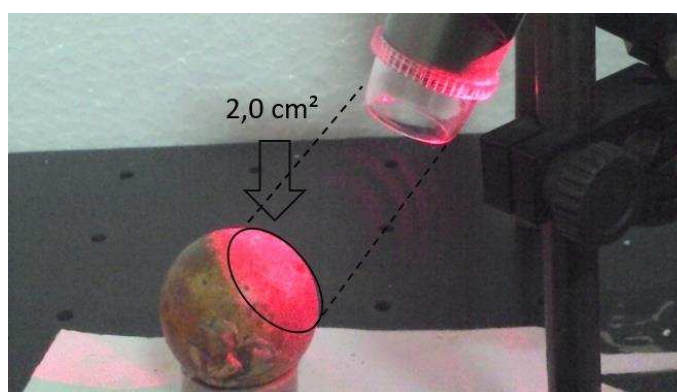


**Figura 2.2.** Vista frontal (a) e lateral (b) da Unidade Experimental

A configuração experimental utilizada foi a denominada *backscattering*, onde o que se observa é o retorno da luz após incidir na amostra (RABAL e BRAGA, 2008).

Em cada sessão de iluminação, foram coletadas 128 imagens sucessivas de 8 bits relativas aos padrões de *biospeckle* em intervalos de 0,08s, permitindo a análise de fenômenos que atuam em frequências de até 6,25Hz.

Foi realizada uma sessão de iluminação no epicarpo de cada fruto em todas as semanas após a florada analisada. As iluminações ocorreram em média 4 horas após as coletas em campo. A área iluminada do fruto foi uma circunferência de aproximadamente 2,0 cm<sup>2</sup> como mostra a Figura 2.3.



**Figura 2.3.** Área aproximada de aquisição das imagens do *biospeckle* durante a sessão de iluminação

Para as análises dos conjuntos de imagens, foi construído o padrão temporal do *speckle*, conhecido como *Time History Speckle Pattern* (THSP) para cada fruto avaliado (OULAMARA et al., 1989). O THSP apresentou uma dimensão 1280x128

pixels tendo sido obtido a partir da linha central de pixels de cada imagem que compõem o conjunto de imagens sucessivas do *biospeckle*. As linhas centrais foram dispostas lado a lado em colunas de forma sequencial, desta forma, a dimensão 1280 valores do THSP correspondeu a dimensão espacial, referente ao tamanho das linhas centrais das imagens, enquanto, a dimensão 128 correspondeu a dimensão temporal, referente ao número de imagens sucessivas adquiridas ao longo de um determinado tempo obtidas de diferentes frutos coletados em 10 épocas diferentes.

A partir da imagem THSP foi construído uma matriz de co-ocorrência computada sobre o THSP de cada fruto de acordo com a Equação 1.

$$MCO = [N_{ij}] \quad (1)$$

Em que, o valor de  $N_{ij}$  corresponde ao número de vezes que o valor de intensidade  $i$  é imediatamente precedido pelo valor de intensidade  $j$ , sendo que a intensidade de  $i$  e  $j$  variam em uma escala de 1 a 256 para uma imagem de 8 bits.

Os índices referentes a atividade biológica (AB) no epicarpo e no mesocarpo dos frutos de macaúba foram gerados pela quantificação das variações de intensidades do padrão do *biospeckle*, utilizando o algoritmo conhecido como Diferenças dos Valores Absolutos AVD (CARDOSO e BRAGA, 2014) segundo equação 2.

$$AB = \sum_{ij} (M_{ij} \frac{MOC_{ij}}{\sum_{ij} MOC_{ij}} |i - j|) \quad (2)$$

Onde  $M_{ij}$  é o valor normalizado da matriz de co-ocorrência nas coordenadas  $i$  e  $j$ , e a  $MOC_{ij}$  é o valor real na matriz de co-ocorrência na linha  $i$  e coluna  $j$ .

### 2.4.3. Análise dos resultados

Inicialmente foi realizada uma análise da dispersão dos valores atividade biológica mensuradas em cada cacho e em cada semana de maturação por meio do diagrama de caixas (*boxplot*). De cada cacho foi avaliada a atividade biológica em cinco frutos, sendo que cada fruto foi considerado um elemento amostral. Desta forma, a análise da dispersão dos valores foi realizada agrupando os elementos amostrais de cacho e em cada estágio de maturação. Valores fora dos limites inferiores e superiores dos diagramas de caixas foram considerados discrepantes, sendo eliminados.

Uma vez eliminados os valores discrepantes de cada cacho, foi calculado um valor médio de atividade biológica para cada uma das 10 semanas de coleta. A partir destes valores, foi aplicada uma regressão linear simples para avaliar a relação entre o número de semanas após a florada e atividade biológica dos frutos. A análise de variância foi utilizada para verificar a significância do modelo de regressão utilizado.

Para avaliar a capacidade da técnica do *biospeckle* em diferenciar semanas de maturação, permitindo definir o momento para colheita dos frutos, foi realizada uma análise de agrupamento por meio de um classificador não supervisionado utilizando o algoritmo k-médias. Os valores médios de atividade biológica mensuradas no epicarpo em cada semana de coleta foram agrupados em duas classes a partir da menor distância para o centroide de cada classe. Foram realizadas 10 iterações, onde nenhum ponto foi incorporado a uma classe diferente da que estava na interação anterior.

A primeira classe constituída por valores de atividade biológica que indicaram que os frutos se encontravam em instantes os quais foram considerados imaturos e impróprios para colheita e a segunda classe constituída por valores de atividade biológica que indicaram que os frutos se encontravam em instantes os quais foram considerados maduros e aptos para colheita.

O teste t para amostras independentes foi utilizado para a comparação estatística entre as médias das atividades biológicas das duas classes a um nível de significância de 5%.

## **2.5. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Na Tabela 2.1 é apresentado o número de frutos utilizados para cada época de maturação analisada após a análise da dispersão dos pontos e eliminação dos frutos que apresentaram valores de atividade biológica considerados discrepantes. Observou-se que em todas as épocas de análise houve redução no número de frutos. Para os valores de atividade biológica obtidos no epicarpo a redução total no número de amostras foi de 8,90%, sendo que o lote de frutos coletados na 53ª SAF apresentou o maior número de discrepantes.

**Tabela 2.1.** Número de frutos coletados e número de frutos analisados em cada semana após a florada (SAF) após a eliminação dos discrepantes

SAF	41	45	49	51	53	55	57	59	60	61	Total
Frutos coletados	100	100	100	98	82	76	95	85	75	75	888
Frutos analisados	94	87	90	95	71	67	88	78	70	69	809

Em uma exploração extrativista de macaúba, os frutos de uma mesma época podem apresentar uma variação acentuada no desenvolvimento, principalmente em frutos de cachos de diferentes plantas (MOTA et al., 2011; MOTOIKE et al., 2013). Este fato pode ser um dos responsáveis pela variabilidade das mensurações da atividade biológica pelo *biospeckle laser* que geraram valores discrepantes.

O cultivo racional e a geração de novas variedades da cultura por meio de cruzamentos genético tendem a reduzir o efeito da maturação irregular dos cachos (MANFIO et al., 2012). Isso faz presumir que tenderá a aumentar a eficiência da aplicação de instrumentos óticos para avaliação da qualidade dos frutos de macaúba, uma vez que as amostras analisadas apresentaram um padrão mais definido.

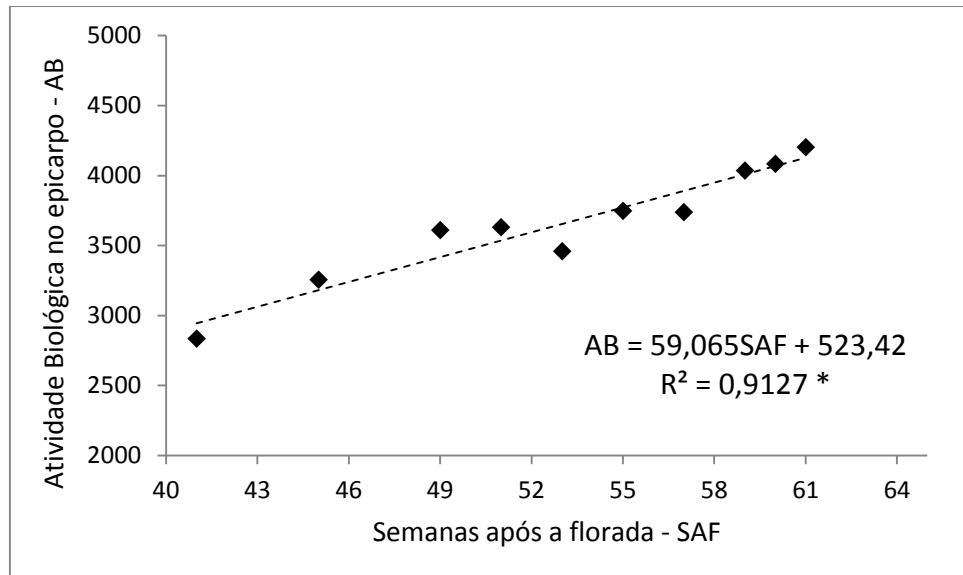
Outro fator que pode estar associado à variabilidade dos valores de atividade biológica, é a alta sensibilidade a fatores externos, como iluminação, ruídos sonoros, vibrações e imprecisões metodológicas que técnicas instrumentais com base em princípios óticos podem apresentar. No caso do *biospeckle laser*, as vibrações externas, a dificuldade em se repetir o posicionamento exato da amostra em relação ao laser e a câmera, e ainda a presença de danos e microfissuras na região iluminada, são fatores que podem afetar a quantificação da atividade biológica gerando valores incoerentes com fenômeno analisado (RABAL e BRAGA, 2008).

Desta forma, a análise de discrepantes pôde eliminar valores que influenciavam de forma direta no comportamento médio do fenômeno analisado, permitindo uma menor dispersão dos valores observados.

### 2.5.1. Relação entre atividade biológica e estágio de maturação

Após a eliminação dos valores discrepantes, foi analisada a relação entre a atividade biológica mensurada pelo *biospeckle laser* e o número de semanas após a florada. Na Figura 2.7 é apresentado o modelo para a resposta da atividade biológica ao longo do desenvolvimento dos frutos medidas no epicarpo. O  $R^2$  de 0,9127 para o

ajuste da atividade biológica no epicarpo demonstra que o *biospeckle laser* tem capacidade de ser uma técnica eficiente para indicar o grau de maturação, podendo ser aplicada diretamente na casca dos frutos de macaúba.



**Figura 2.4.** Análise de regressão linear simples relacionando a atividade biológica no epicarpo e o número de semanas após a florada. Ajuste significativo a um nível de 5%

A atividade medida pelo *biospeckle laser* pode estar relacionada com o movimento físico de partículas e organelas no interior das células. Esta movimentação intracelular torna-se mais intensa devido ao transporte de nutrientes, partículas e ação de enzimas a medida que ocorre o avanço na maturação dos frutos (CHITARRA e CHITARRA, 2005). Desta forma, a movimentação citoplasmática pode ser vista como uma indicação da atividade celular estando relacionada com os processos metabólicos das células.

No trabalho desenvolvido por Zdunek e Herppich (2014) usou-se a técnica do *biospeckle* como uma ferramenta potencial para predizer de forma não destrutiva o estágio de maturação de maçãs. De maneira similar, a relação obtida entre atividade biológica e estádios de desenvolvido dos frutos de macaúba foi observada nos resultados com maçã, demonstrando também um aumento da atividade biológica durante o período de desenvolvimento do fruto, sendo mais evidente nos períodos mais avançados de maturação. O aumento da atividade biológica foi atribuído ao aumento dos sólidos solúveis e com uma diminuição no teor de amido.

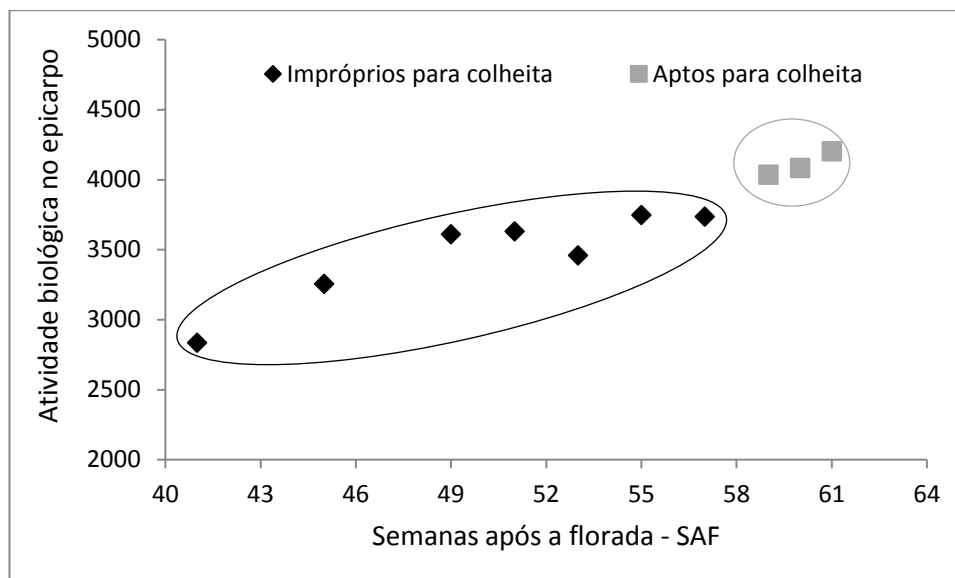
Montoya (2013) demonstrou, que em frutos de macaúba, o teor de amido tende a apresentar uma queda gradual a partir da 36ª SAF. Assim, o aumento da atividade biológica em função da época de maturação mensurada neste trabalho vai ao encontro com os resultados observados em Zdunek e Herppich (2014) e Montoya (2013).

### **2.5.2. Definição do ponto de colheita**

Montoya (2013) definiu que a maturação dos frutos de macaúba ocorre em duas etapas. A etapa I, entre as 14ª e 36ª semanas após a florada, foi relacionada com o amadurecimento físico do fruto. Já a etapa II, a partir da 36ª SAF, foi caracterizada como a maturação bioquímica, indicada pela redução do teor de amido e início do acúmulo de teor de óleo. Tomando como base esta divisão, uma vez que as análises deste trabalho foram realizadas a partir da 41ª SAF, todos os estádios avaliados neste experimento se encontraram na fase de maturação bioquímica.

Durante o processo de maturação bioquímica do fruto, as atividades metabólicas como redução do teor de amido, degradação da clorofila e aumento na reserva de sólidos solúveis ocorrem de forma intensa (CHITARRA e CHITARRA, 2005). Visto que a clorofila é um dos indicadores de maturação que apresenta alta correlação com a atividade biológica mensurada pelo *biospeckle*, (DA SILVA, 2007; NASSIF, et al., 2012; HU et al., 2013), a redução de seus teores nos frutos próximos a maturação fisiológica pode ser o fator responsável pelos menores valores quantitativos da atividade biológica, permitindo que este parâmetro sirva como indicativo para o ponto de colheita.

Desta forma, foi realizada por meio da análise de agrupamento em classes (K-médias) a distinção de frutos em instantes considerados imaturos, e, portanto, inapropriados para colheita e frutos em instantes considerados maduros e aptos para colheita tendo como base a atividade biológica no epicarpo. Na Figura 2.5 é possível analisar que a atividade biológica permitiu a distinção das classes a partir da 59ª SAF, indicando que a partir desta época os frutos estão aptos para colheita.



**Figura 2.5.** Agrupamento em classes (K-médias) para a distinção de frutos em instantes considerados inapropriados para colheita e em instantes considerados aptos para colheita tendo como base a atividade biológica no epicarpo.

A partir da comparação entre as médias das atividades biológicas dos cachos em cada classe (Tabela 2.2) foi possível diferenciar o grupo de frutos considerados impróprios (entre a 41 e a 57<sup>a</sup> SAF) e o grupo de frutos considerados aptos para colheita (a partir da 59<sup>a</sup> SAF).

**Tabela 2.2.** Teste t para a comparação entre as médias da atividade biológica dos cachos componentes de cada classe

Classe	Médias
Frutos imaturos – inapropriados para colheita	3462 <i>a</i>
Frutos maduros – aptos para colheita	4101 <i>b</i>

Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de t a um nível de significância de 5%

Os resultados apresentados obtidos pelo agrupamento reforçou a hipótese de que a redução do teor de clorofila afetada pela diminuição da presença do pigmento fotossintético próximas ao ponto de maturação fisiológica dos frutos teve influência direta na atividade biológica mensurada pelo *biospeckle laser*. Zdunek e Herppich, (2012) demonstraram que o menor conteúdo de clorofila em maçãs resultou no aumento da atividade do *biospeckle* devido a menor absorção e conseqüentemente, o maior espalhamento da luz refletida. Frutos em estádios iniciais de maturação tendem

apresentar altos teores de clorofila, sendo este reduzido durante o desenvolvimento do fruto (MENEZES et al., 1998; LIMA et al., 2002; PINTO et al., 2013).

A absorção do laser pela clorofila limita a quantidade de luz que penetra nas amostras, fazendo com que o espalhamento refletido captado pela câmera seja menor, o que gera padrões do *biospeckle* pouco variável e, conseqüentemente, baixos valores no índice de atividade biológica (RABAL e BRAGA, 1998).

Além do mais, a produção de substâncias voláteis tais como álcoois, ésteres e carbonilos durante o desenvolvimento do fruto, como ocorre na macaúba, também pode ser associado ao aumento da atividade biológica principalmente nas mensurações realizadas no mesocarpo do fruto (ANSARI e NIRALA, 2013; SZYMANSKA-CHARGOT et al., 2012).

Trabalhos, como o de Montoya (2013), apontam que o fruto de macaúba atinge sua maturação fisiológica próxima a 62ª semana após a florada. Por meio da atividade biológica, foi possível diferenciar os frutos contidos no grupo a partir de mensurações efetuadas no epicarpo.

Assim, atividade biológica obtida por meio da aplicação da técnica do *biospeckle laser* pode ser considerada um parâmetro viável para avaliação do grau de maturação da macaúba e uma ferramenta promissora para indicação do ponto de colheita, abrindo o precedente para que sensores sejam construídos a partir do princípio desta técnica.

## 2.6. CONCLUSÕES

Observou-se um aumento da atividade biológica ao longo das semanas após a florada dos frutos de macaúba ao se analisar diretamente o epicarpo, apresentando uma relação linear significativa entre atividade biológica e semanas de maturação. Estes resultados demonstraram a capacidade efetiva da técnica ótica do *biospeckle laser* em acompanhar o desenvolvimento da maturação dos frutos de macaúba.

A atividade biológica mensurada no epicarpo se apresentou como um eficiente indicador para a definição do momento de colheita, demonstrando que os frutos podem ser considerados próximos a maturação fisiológica e aptos para colheita, a partir 59ª semanas após a florada.

## 2.7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDULLAH, M. Z.; GUAN, L. C.; LIM, K. C.; KARIM, A. A. The applications of computer vision system and tomographic radar imaging for assessing physical properties of food. **Journal of Food Engineering**, v.61, 125–135p., 2004.

ALVES, J. A.; BRAGA, R. A.; VILAS BOAS, E. V. de B. Identification of respiration rate and water activity change in fresh-cut carrots using biospeckle laser and frequency approach. **Postharvest Biology and Technology**, v. 86, p. 381-386, 2013.

ANDRADE, M. H.; VIEIRA, A. S.; AGUIAR, H. F.; CHAVES, J. F.; NEVES, R. M. P. S.; MIRANDA, T. L.; SALUN, A. Óleo do fruto da palmeira macaúba. Parte II: Processo de extração do óleo. **II ENBTEQ-Encontro Brasileiro sobre Tecnologia na Indústria Química/III Seminário ABIQUIM de Tecnologia**, São Paulo: ABEQ, 2006.

ANSARI, M. Z., NIRALA, A. K. Activity assessment of fruits using the methods of inertia moment and absolute value of the differences. **Journal of Advanced Laser and Optics Research**, v.1, n.1, p. 7-16, 2012.

ANZONINI, S. R. C.; MENEGHIN, S. P.; URASHIMA, A. S. Técnicas Básicas de Biologia Molecular, Araras. **EdUFSCar**, 57p. 2004.

ARIZAGA, R.; TRIVI, M. RABAL, H. Speckle time evolution characterization by the cooccurrence matrix analysis. **Optics and Laser Technology**, Amsterdam, v. 31, n. 2, p. 163-169, 1999.

BETEMPS, D. L.; FACHINELLO, J. C.; GALARÇA, S. P. Espectroscopia do visível e infravermelho próximo (VIS/NIR) na avaliação da qualidade de mangas TOMMY, A. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal--SP, Volume Especial, E, 2011.

BOBELYN, E.; SERBAN, A. S.; NICU, M.; LAMMERTYN, J.; NICOLAI, B. M.; SAEYS, W. Postharvest quality of apple predicted by NIR spectroscopy: study of the effect of biological variability on spectra and model performance. **Postharvest Biology and Technology**, v. 55, 133–143p., 2010.

BRAGA, R. A.; CARDOSO, R. R.; BEZERRA, P. S.; WOUTERS, F.; SAMPAIO, G. R.; VARASCHIN, M. S. Biospeckle numerical values over spectral image maps of activity. **Optics Communications**, v. 285, p. 553-561, 2012.

BUTZ, P.; HOFMANN, C.; TAUSCHER, B. Recent developments in noninvasive techniques for fresh fruit and vegetable internal quality analysis. **Journal of Food Science**, v.70, n.9, 131–141p. 2005.

CARDOSO, R. R.; COSTA A. G.; NOBRE, C. M. B.; BRAGA R. A. Frequency signature of water activity by biospeckle laser. **Optics Communications**, Amsterdam, v. 284, n. 8, p. 2131-2136, Abril, 2011.

CARDOSO, R. R.; BRAGA, R. A. Enhancement of the robustness on dynamic speckle laser numerical analysis. **Optics and Lasers in Engineering**, v. 63, p. 19-24, 2014.

CEROVIC, Z. G.; MOISE, N.; AGATI, G.; LATOUCHE, G.; GHOZLEN, N. B.; MEYER, S. New portable optical sensors for the assessment of winegrape phenolic maturity based on berry fluorescence. **Journal of Food Composition and Analysis**, v.21, p.650– 654, 2008.

CHEN, L.; SUN, Z. A. Review of Non-destructive Methods for Quality Evaluation and Sorting of Agricultural Products. **Journal Agricultural Engineering Research**. v.49, p.85-98, 1991.

CHITARRA, M. I. F.; CHITARRA, A. B. Pós-colheita de frutos e hortaliças: fisiologia e manuseio. **2. ed. Lavras: UFLA**, 785 p. 2005.

COSTA, A. G. Predição e identificação de danos internos em batatas por meio do biospeckle laser. **Dissertação**. Universidade Federal de Lavras. Lavras-MG, 81p., 2011.

DA SILVA, E. R. Estudo das Propriedades do Biospeckle e suas Aplicações. **Tese de Doutorado**. Universidade de São Paulo. 2007.

ELMASRY, G., WANG, N., ELSAYED, A., NGADI, M. Hyperspectral imaging for nondestructive determination of some quality attributes for strawberry. **Journal of Food Engineering**, v.81, n.1, 98-107p., 2007.

GODINHO, R. P.; SILVA, M. M.; NOZELA, J. R.; BRAGA, R. A. Online biospeckle assessment without loss of definition and resolution by motion history image. **Optics and Lasers in Engineering**, v. 50, p. 366-372, 2012.

HAZIR, M. H. M.; SHARIFF, A. R. M.; AMIRUDDIN, M. D.; RAMLI, A. R.; SARIPAN, M. I. Oil palm bunch ripeness classification using fluorescence technique. **Journal of Food Engineering**, v.113, p. 534–540, 2012.

HENDERSON, A.; GALEANO, G.; BERNAL, R. Field guide to the palms of the Americas, **Princeton University**, p.166 – 167, 1995.

HIANE P. A., Ramos Filho M. M., Ramos M. I. L., Macedo M. L. R. Bocaiuva, *Acrocomia aculeata (Jacq.) Lodd.*, Pulp and Kernel Oils; characterization and Fatty acid Composition. Braz. **Journal Food and Technology**. v.8, p.256-259, 2005.

HU, M.; DONG, Q.; LIU, B.; TU, K.; SONG, X. Application of biospeckle on analysis of agricultural products quality. **Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering**, v. 29, n. 24, p. 284-292, 2013.

IGNAT, T.; SCHMILOVITCH, Z.; FEFÖLDI, J.; BERNSTEIN, N.; STEINER, B., EGOZI, H.; HOFFMAN, A. TIMEA. Nonlinear methods for estimation of maturity stage, total chlorophyll, and carotenoid content in intact bell peppers. **Biosystems Engineering**, v. 114, n. 4, p. 414-425, 2013.

KLUGE R. A.; PICOLI A. A.; AGUILA J. S. Respiração e produção de etileno em beterrabas inteiras e minimamente processadas submetidas a tratamentos com etileno e biorreguladores. **Horticultura Brasileira**, v.28, p.54-57, 2010.

LIEW, C. Y.; LAU, C.Y. Determination of quality parameters in Cavendish banana during ripening by NIR spectroscopy. **Int Food Res J**, v. 19, p. 751-758, 2012.

LIMA, E. D. P. A.; LIMA, C. D. A.; ALDRIGUE, M. L.; GONDIM, P. J. S. Caracterização física e química dos frutos da umbu-cajazeira (*Spondias spp*) em cinco estádios de maturação, da polpa congelada e néctar. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 24, n. 2, p. 338-343, 2002.

LORENZI, G. M. A. C.; PIMENTEL, L. D.; DE PAULA, S. R.; NEGRELLE, R. R. B.; PAES, J. M. V. Prospecção da cadeia produtiva dos frutos da palmeira macaúba no estado de Minas Gerais. **Informe Agropecuário- EPAMIG**. Belo horizonte. v.32, n.265., p.41-51, 2011.

MACIEL, M. I. S; MÉLO, E.; LIMA, V.; SOUZA, K. A.; SILVA, W. Caracterização físico-química de frutos de genótipos de aceroleira (*Malpighia emarginata D.C.*). **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v.30, n.4, p.865-869, 2010.

MANFIO, C. E.; MOTOIKE, S. Y.; DE RESENDE, M. D. V.; DOS SANTOS, C. E. M.; SATO, A. Y. Avaliação de progênies de macaúba na fase juvenil e estimativas de parâmetros genéticos e diversidade genética. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 32, n. 69, p. 63, 2012.

MANICA, I.; ICUMA, I. M.; JUNQUEIRA, N. T. V.; SALVADOR, J. O.; MOREIRA, A.; MALAVOLTA, E. Fruticultura tropical. **Editora Cinco Continentes**. 373p. Porto Alegre, 2000.

MATSIMBE, S. F. S.; MONTTOIKE, S. Y.; PINTO, F. A.C.; LEITE, H. G.; MARCATTI, G. H. Prediction of oil content in the mesocarp of fruit from the macauba palm using spectrometry<sup>1</sup>. **Revista Ciência Agronômica**, v. 46, n. 1, p. 21-28, 2015.

MENEZES, J. B.; CHITARRA, A. B.; CHITARRA, M. I. F.; BICALHO, U. O. Caracterização do melão tipo Gália durante a maturação. **Horticultura Brasileira**, v. 16, n. 2, p. 123-127, 1998.

MONTOYA, S.G. Caracterização do desenvolvimento do fruto da palmeira macaúba. **Dissertação**. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, MG, p.51, 2013.

MOTA, C. S.; CORRÊA, T. R.; GROSSI, J. A. S.; CASTRICINI, A; RIBEIRO, A. S. Exploração sustentável da macaúba para produção de biodiesel: colheita, pós-colheita e qualidade dos frutos. **Informe Agropecuário EPAMIG**. Belo horizonte, v.32, n.265, p.41-51, 2011.

MOTOIKE, S. J.; CARVALHO, M.; PIMENTEL, L. D.; KUKI, K. N.; PAES, J. M. V.; DIAS, H. C. T.; SATO, A. Y. A cultura da macaúba: implantação e manejo de cultivos racionais. **Editora UFV**. Viçosa, Minas Gerais, p.61, 2013.

NASSIF, R.; PELLEN, F.; MAGNÉ, C.; LE JEUNE, B.; LE BRUN, G.; ABBOUD, M. L. Scattering through fruits during ripening: laser speckle technique correlated to biochemical and fluorescence measurements. **Optics express**, v. 20, n. 21, p. 23887-23897, 2012.

OULOMARA, G.; TRIBILLON, J.; DUVERNOY, J. Biological activity measurements on botanical specimen surfaces using a temporal the correlation effect of laser speckle. **Journal of Moderns Optics**, v. 36, n. 2, p. 136-179, Feb. 1989.

PAJUELO, M.; BALDWIN, G.; RABAL, H. J.; CAP, N.; ARIZAGA, R.; TRIVI, M. Bio-speckle assessment of bruising in fruits. **Optics and Lasers Engineering**, v. 40, n. 2, p. 13-24, 2003.

PIMENTEL, L. D.; DIAS, L. A. S.; PAES, J. M. V.; SATO, A. Y.; MONTOIKE, S. Y. Recomendação de adubação e calagem para o cultivo de macaúba: 1º aproximação. **Informe Agropecuário-EPAMIG**. Belo Horizonte, v.32, n.265, p.20-30, 2011.

PINTO, P. M.; JACOMINO, A. P., DA SILVA, S. R.; ANDRADE, C. A. W. Ponto de colheita e maturação de frutos de camu-camu colhidos em diferentes estádios. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 48, n. 6, p. 605-612, 2013.

QUEIROZ, L.; NASCIMENTO, C.; SANTOS, V.; CREN, E.; ANDRADE, M. Avaliação dos microrganismos presentes nos frutos da macaúba (*Acrocomia Aculeata*) após diferentes tratamentos pós-colheita. **Blucher Chemical Engineering Proceedings**, v. 1, n. 2, p. 4595-4602, 2015.

RABAL, H. J, et al. Transient phenomena analysis using dynamic speckle patterns. **Optical Enginnering**, Virginia, v. 35, p. 57-62, Sept. 1998.

RABAL, H. J.; BRAGA, R. A. Dynamic laser speckle and applications. **Boca Raton: CRC**, p. 304, 2008.

RABELO; G. F. BRAGA, R.A.; FABBRO, I.M.D.; TRIVI, M.R.; RABAL H.J.; ARIZAGA, R. Laser speckle techniques in quality evaluation of Orange fruits. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 9, n. 4, p. 570-575, 2005.

ROMERO, G. G.; MARTINEZ, C. C.; ALANIS, E. E.; SALAZAR, G. A.; BROGLIA, V. G.; ALVAREZ, L. Bio-speckle activity applied to the assessment of tomato fruit ripening. **Biosystems Engineering**, v.103, p.116–119, 2009.

RAJKUMAR, P.; WANG, N.; EIMASRY, G.; RAGHAVAN, G. S. V.; GARIEPY, Y. Studies on banana fruit quality and maturity stages using hyperspectral imaging. **Journal of Food Engineering**, v.108, n.1, 194-200p., 2012.

ROSCOE, R.; RICHETTI, A.; MARANHO, E. Análise de viabilidade técnica de oleaginosas para produção de biodiesel em Mato Grosso do Sul. **Revista Política Agrícola**, 16, 48-59, 2007.

SAEED, O. M. B.; SANKARAN, S.; SHARIFF, A. R. M.; SHAFRI, H. Z. M.; EHSANI, R.; ALFATNI, M. S.; HAZIR, M. H. M. Classification of oil palm fresh fruit bunches based on their maturity using portable four-band sensor system. **Computers and Electronics in Agriculture**, v.82, p.55, 2010.

SANTOS, J. L.; RESENDE, E. D. D.; MARTINS, D. R.; GRAVINA, G. D. A.; CENCI, S. A.; MALDONADO, J. F. Determination of the harvest point of different passion fruit cultivars. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, n. 7, p. 750-755, 2013.

SOUZA, C F. T. Desenvolvimento, maturação e sistemas de colheita de frutos da macaúba (*Acrocomia aculeata*). **Dissertação**. Universidade Católica Dom Bosco, Campo Grande, 2013. 75p.

SZYMANSKA-CHARGOT, M., ADAMIAK, A., ZDUNEK, A. Pre-harvest monitoring of apple fruits development with the use of biospeckle method. **Scientia Horticulturae**, 145, 23-28, 2012.

TAN, Y. A.; LOW, K. W.; LEE, C. K.; LOW, K. S., Imaging technique for quantification of oil palm fruit ripeness and oil content. **European Journal of Lipid Science and Technology**. v.112, n.8, p. 838-843. 2010.

ZDUNEK, A., HERPPICH, W. B. Relation of biospeckle activity with chlorophyll content in apples. **Postharvest Biology and Technology**, v.64, n.1, p. 58-63, 2012.

ZDUNEK, A.; ADAMIAK, A.; PIECZYWEK, P. M.; KURNDA, A. The biospeckle method for the investigation of agricultural crops: A review. **Optics and Lasers in Engineering**, v. 52, p. 276-285, 2014.

## **CAPÍTULO 3**

### **RELAÇÃO ENTRE ATIVIDADE BIOLÓGICA MENSURADA PELO BIOSPECKLE LASER E A FIRMEZA DA POLPA DE FRUTOS DE MACAÚBA**

### **3. RELAÇÃO ENTRE ATIVIDADE BIOLÓGICA MENSURADA PELO BIOSPECKLE LASER E A FIRMEZA DA POLPA DE FRUTOS DE MACAÚBA**

#### **3.1. RESUMO**

O conhecimento do ponto de maturação fisiológica dos frutos de macaúba é determinante para que a colheita seja realizada no momento certo, possibilitando a implantação de um sistema de colheita eficiente e que permita a extração do óleo de maior qualidade e quantidade. A determinação da firmeza da polpa de frutos e vegetais é uma forma prática de avaliar o estágio de maturação. Instrumentos óticos vêm sendo utilizados como uma alternativa a métodos invasivos para classificar produtos de acordo com a variedade, maturação e qualidade de produtos agrícola. No entanto, o estudo de técnicas aplicáveis especificamente para classificação dos frutos de macaúba quanto a maturação ainda são escassos. O objetivo deste trabalho foi avaliar a relação entre a atividade biológica mensurada pela técnica ótica do *biospeckle laser* e a firmeza medida na polpa do fruto de macaúba em diferentes semanas de maturação após a florada dos frutos. A atividade biológica foi quantificada por meio do algoritmo da diferença dos valores absolutos aplicada aos padrões do *biospeckle*, enquanto que a firmeza da polpa dos frutos foi determinada por meio de um penetromêtro digital. Foram avaliadas as correlações entre atividade biológica e firmeza da polpa em durante o desenvolvendo dos frutos e durante o período de senescência a maturação fisiológica dos frutos. Os resultados demonstraram uma correlação significativa durante o desenvolvimento dos frutos onde o aumento da atividade biológica foi associado à redução da firmeza da polpa. Já no período de senescência a correlação significativa demonstrou que a redução da atividade biológica foi associada a redução da firmeza da polpa. Assim, concluiu-se que a técnica ótica do *biospeckle laser* pode ser um eficiente indicador não invasivo do grau de maturação dos frutos de macaúba auxiliando na determinação do momento de colheita.

**Palavras-chave:** Maturação dos frutos; colheita; instrumentos óticos.

### **3.2. ABSTRACT**

#### **RELATIONSHIP BETWEEN BIOLOGICAL ACTIVITY MEASURED BY LASER BIOSPECKLE AND PULP FIRMNESS OF MACAW PALM FRUITS**

Knowing the maturation stage of macaw palm fruits is crucial for harvest to occur at the right time, enabling the implementation of an efficient collection system, allowing extracting oil of higher quality and quantity. Determining the firmness of fruit and vegetable pulp is a practical way to assess the maturation stage. Optics instruments have been used as an alternative to invasive methods to classify products according to variety, maturation and quality of agricultural products. However, studies of specific techniques for the classification of macaw palm fruits in relation to maturation are still scarce. The aim of this study was to evaluate the relationship between biological activity measured by biospeckle laser optical technique and firmness measured in the macaw palm fruit pulp at different weeks of maturation after flowering fruits. The biological activity was quantified by absolute value difference algorithm applied to biospeckle patterns, while the fruit pulp firmness was determined by digital penetrometer. The correlations between biological activity and firmness in during the developing fruit and during the period of senescence after physiological maturity of the fruits were evaluated. The results showed a significant correlation during fruit development where the increase in biological activity was associated with reduced firmness. Already significant correlation in senescence period demonstrated that the reduction of biological activity was associated with reduced firmness. Thus, it is concluded that the biospeckle laser technique can be an effective non-invasive indicator of the degree maturation of macaw palm fruit, contributing to determine the harvest time.

**Keywords:** Maturation of fruits; harvest; optical instruments.

### 3.3. INTRODUÇÃO

Perdas na qualidade dos produtos agrícolas ocorrem devido a uma série de fatores desde a colheita até o consumo do produto final. Um dos fatores da queda de qualidade está ligado ao ponto de maturação em que os frutos são colhidos e a senescência dos mesmos após a colheita (VILELA et al., 2003; KOHATSU et al., 2011; PERREIRA et al., 2014).

Em geral, frutos colhidos imaturos apresentam perda de água e são suscetíveis a desordens fisiológicas que afetam o aroma, o sabor e a aparência em função das alterações na coloração, textura, concentração de açúcares e compostos ácidos e fenólicos. Já frutos colhidos após o ponto de maturação fisiológica entram rapidamente em senescência (MANICA et al., 2000).

A determinação do estágio de maturação fisiológico é essencial para que a colheita seja realizada no momento certo, além de ser um fator determinante para o manejo adequado na pós-colheita (FARIAS et al., 2011; CHITARRA et al., 2005) para que o produto se apresente com a melhor qualidade possível, seja para consumo ou outros fins.

A macaúba (*Acrocomia aculeata*) é uma palmeira nativa de florestas tropicais, considerada uma cultura promissora como matéria-prima para produção de biodiesel, devido às suas características positivas, como alta produtividade de óleo, rusticidade, ampla adaptabilidade em diferentes regiões, possibilidade de cultivo em sistemas agrossilvipastoris, produção de óleos e coprodutos sem toxinas, dentre outros (PIMENTEL et al., 2011).

Em termos de produtividade de frutos, a macaúba pode produzir até 25 t.ha<sup>1</sup>ano<sup>-1</sup>. A mamona, uma das principais culturas utilizadas na produção de biodiesel, apresenta uma produtividade de 5 mil kg ha<sup>-1</sup>ano<sup>-1</sup> (MILANI, 2006), o que corresponde a apenas 20% da produtividade da macaúba. Plantas nativas de macaúba produzem cerca de 8 cachos por planta, com até 500 frutos, podendo atingir à produção de até 160 a 200 kg de frutos por planta em uma safra (MOTOIKE et al., 2013).

O período de safra é influenciado pelas variações de clima em cada região. Em Minas Gerais, a safra inicia-se em outubro e se estende até março. De modo geral, a frutificação varia de um período de 350 a 400 dias. Na exploração da macaúba de forma extrativista, o indicativo do ponto de colheita é quando se observa a queda

natural dos primeiros frutos nos cachos (LORENZI et al., 2011; MOTOIKE et al., 2013).

A maturação dos diferentes cachos da mesma planta não é uniforme, ocorrendo de acordo com a emissão da inflorescência, sendo necessário realizar diversas colheitas ao longo da safra (MOTOIKE et al., 2013), o que dificulta a exploração em um sistema de produção em larga escala. A determinação dos estádios de maturação possibilita a implantação de um sistema de colheita que permite a extração do óleo de maior qualidade e quantidade para a aplicação em diversos fins.

Para a determinação do ponto de maturação fisiológica, são utilizados vários métodos que levam em conta as características físicas e químicas de cada produto. Os métodos de mensuração direta, apesar da confiabilidade nas análises, apresentam desvantagens como a destruição da amostra para análise (AZZOLINI et al., 2004; FARIAS et al., 2011). Os métodos diretos são processos muitas vezes demorados, de níveis laboratoriais e de custos elevados. Já os métodos de mensuração indireta aparecem como uma alternativa para minimizar estas desvantagens, uma vez que permitem a obtenção das medidas de forma rápida, precisa e sem destruição da amostra avaliada (BUTZ et al., 2005; ELMASRY et al., 2007; BOBELYN et al., 2010).

Para determinação de estádios de maturação, são utilizados índices associados a medidas físico-químicas realizadas ao longo do desenvolvimento dos frutos e vegetais definidos a partir de testes laboratoriais. Um dos principais parâmetros utilizados é a avaliação da firmeza da polpa do produto (CHITARRA e CHITARRA, 2005). A redução na firmeza da polpa durante a fase de maturação ocorre devido à perda da integridade de substâncias pécticas que compõem a parede celular. Além do mais, a degradação do amido e a perda do turgor são fatores responsáveis pela redução da firmeza de produtos agrícolas (STEFFENS et al., 2009; FELLMAN et al., 2011; FREIRE et al., 2011).

Estudos associados à perda de água e degradação de frutos e vegetais no período de senescência também utilizam índices relacionados à firmeza do produto como indicadores de qualidade e vida útil (STANGER et al., 2014; ALVES et al. 2013; SILVA et al., 2013).

Para a avaliação das características dos frutos e vegetais como o teor de umidade, teor de sólidos solúveis totais e firmeza, as quais são utilizadas para a definição do ponto de maturação destes produtos, em geral utilizam-se métodos

instrumentais e químicos, destrutivos e que envolvem trabalhos manuais afetando a precisão da análise (STANGER et al., 2014; AGUIAR et al., 2012).

Diversos trabalhos vêm utilizando métodos indiretos de análise, com base em técnicas óticas, elétricas e comportamento dinâmico de corpos, para classificar produtos agrícolas de diferentes variedades, pontos de maturação, qualidades e contaminações por doenças (SANTOS et al., 2010; SOLTANI et al., 2010; ABOUDAUD et al., 2012). As principais vantagens destas técnicas são a alta precisão, a produção de resultados consistentes e a não necessidade de destruição do produto avaliado.

A aplicação e desenvolvimento de tecnologias, especificamente para a macaúba, é de fundamental importância para a produção racional da cultura, uma vez que há estudos escassos sobre os sistemas de colheita e extração do óleo sendo utilizadas tecnologias adaptadas de outras oleaginosas (MONTIKE et al., 2013).

A técnica ótica conhecida como *biospeckle laser* tem sido amplamente empregada em estudos com qualidade de alimentos (ROMERO et al., 2009; AMARAL et al., 2013; ALVES et al., 2013). O *biospeckle laser* baseia-se em um fenômeno óptico de interferência que ocorre quando um feixe de luz coerente incide sobre uma superfície de um material onde há ocorrência de uma atividade de origem biológica (RABAL et al., 2003). Observado ao longo do tempo, os padrões sucessivos do *biospeckle* se tornam passíveis de monitoramento.

A mudança ao longo do tempo dos padrões do *biospeckle* está diretamente associada com a atividade biológica existente no material biológico analisado. A correlação entre a atividade biológica de um material e o grau de variação do padrão de *biospeckle* ao longo do tempo pode ser observada em diversos trabalhos ligados a agricultura (PAJUELO et al., 2003; ROMERO et al., 2009; BRAGA et al., 2009; CARDOSO et al., 2011; ZDUNEK e HERPPICH, 2012).

Chargot et al. (2012), com finalidade de apresentar um método não destrutivo para análise da maturação, utilizaram a técnica do *biospeckle laser* para avaliar o estágio de maturação de maçãs, comparando a atividade biológica mensurada com o grau de firmeza do fruto. Os resultados demonstram um aumento na atividade biológica nas fases de pós-colheita a qual obteve correlação significativa com os valores de firmeza. Outros trabalhos ratificam a relação entre atividade biológica e a maturação de frutos e de vegetais (ROMERO et al., 2009; ZDUNEK e HERPPICH, 2012; ALVES et al., 2013).

A proposta deste trabalho foi avaliar a relação entre a atividade biológica mensurada pelo *biospeckle laser* e a firmeza medida na polpa do fruto de macaúba ao longo das semanas de maturação e durante o período de senescência após a colheita dos frutos.

### 3.4. MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.4.1. Local da coleta e padronização das amostras

Os frutos utilizados no experimento foram coletados na área experimental localizada no município de Acaiaca, situado na Zona da Mata Mineira a 20° 23' 33'' de latitude Sul e 47° 07' 31'' de longitude Oeste, com altitude média de 601 m. A área foi composta por plantas adultas de macaúba, da espécie *Acrocomia aculeata*, com mais de 10 anos, em estágio reprodutivo, sendo cultivadas de forma natural, sem fins comerciais e sem nenhum tratamento prévio do solo.

Foram avaliados 10 épocas de maturação diferentes, compreendidos entre a 40<sup>a</sup> e a 61<sup>a</sup> semana após a florada (SAF), entre Setembro de 2013 à Fevereiro de 2014. Em cada coleta objetivou-se obter 100 frutos de 20 árvores diferentes, sendo demarcado um cacho por árvore.

Durante a realização do experimento, fatores como o reagrupamento de frutos devido a época de maturação, a redução drástica no número de frutos em cachos específicos provocado por intempéries naturais, o abortamento de alguns cachos durante o período do experimento (após a 57<sup>a</sup> SAF) e questões eventuais referentes a condução do experimento influenciaram de forma direta no número total de amostras coletadas, contribuindo para a redução deste número.

Após uma análise de dispersão por meio do diagrama de caixa foram eliminados os valores de atividade biológica discrepantes em cada cacho e em cada semana de maturação. A Tabela 3.1 apresenta o número final de frutos analisados em cada semana de coleta.

**Tabela 3.1.** Número de frutos analisados em cada semana do experimento

SAF	41	45	49	51	53	55	57	59	60	61	Total
Nº de frutos	94	93	91	90	83	67	88	79	69	69	823

### 3.4.2. Aquisição das imagens do *biospeckle laser*

O aparato experimental para a aquisição das imagens foi constituído de um microscópio portátil de alta resolução, ligado diretamente a entrada USB de um computador, um laser de He-Ne de 50mW de potência, suportes móveis e um jogo de lentes e filtros redutores de intensidade. O laser foi posicionado a uma altura de 15 cm com uma inclinação de aproximadamente 60° em relação à amostra. O microscópio foi posicionado a 25 cm de altura da posição das amostras com uma inclinação de aproximadamente 60° em relação à amostra, de modo que a região iluminada do fruto fosse visualizada, gerando assim o padrão do *biospeckle* a ser analisado.

O *software Speckle Tools* (GODINHO et al., 2012) foi utilizado para realizar a aquisição das imagens coletadas pelo microscópio portátil. Em cada sessão de iluminação, foram coletadas 128 imagens sucessivas de 8 bits relativas aos padrões de *biospeckle* em intervalos de 0,08s, com a frequência de amostragem limitadas entre 0 a 6,25Hz. A região de iluminação nos frutos foi uma circunferência de aproximadamente 20 cm<sup>2</sup>.

Para as análises dos conjuntos de imagens, foi construído o padrão temporal do *speckle*, conhecido como *Time History Speckle Pattern* (THSP) para cada fruto avaliado (OULAMARA et al., 1989). Para construção do THSP, foi retirado a linha central de pixels de cada imagem que compõe o conjunto de imagens sucessivas. As linhas foram colocadas lado a lado dispostas em colunas. Em uma dimensão ficou registrado um conjunto de 1280 pixels que corresponderam à distribuição espacial do padrão e na outra dimensão a evolução temporal destes pixels ao longo dos 128 de instantes sucessivos.

Foi construído uma matriz de co-ocorrência (MOC) computada sobre o THSP de cada fruto, onde padrões com baixas variações de intensidade ao longo do tempo (baixa atividade) apresentaram valores não nulos de ocorrências apenas na diagonal principal. Por outro lado, nos padrões que apresentaram grande atividade, os elementos não nulos se espalharam ao redor da diagonal principal.

Para a quantificação das variações de intensidades do padrão do *biospeckle*, foi utilizado o algoritmo conhecido como Diferenças dos Valores Absolutos (CARDOSO e BRAGA, 2014), que se baseia no cálculo das variações de intensidades do THSP gerados a partir dos padrões do *biospeckle laser* de acordo com a Equação 1. Assim,

foram gerados índices referentes a atividade biológica (AB) para o mesocarpo (polpa) dos frutos de macaúba.

$$AB = \sum_{ij} (M_{ij} \frac{MOC_{ij}}{\sum_{ij} MOC_{ij}} |i - j|) \quad (1)$$

Onde  $M_{ij}$  é o valor normalizado da matriz de co-ocorrência nas coordenadas  $i$  e  $j$ , e a  $MOC_{ij}$  é o valor real na matriz de co-ocorrência na linha  $i$  e coluna  $j$ .

### 3.4.3. Determinação da firmeza dos frutos e momentos de análise

A medida da firmeza foi realizada na polpa (mesocarpo) do fruto, utilizando um penetrômetro digital, da marca *Instrutherm*, modelo PTR-300, com ponteira de 5,00 mm de diâmetro, e os resultados expressos em Newton (N). Os frutos ficaram armazenados sob a temperatura controlada de 22°C. Tanto a avaliação da firmeza, quanto a mensuração da atividade biológica foram realizadas na polpa do fruto.

O experimento foi dividido em dois momentos de acordo com o grau de maturação dos frutos. No primeiro momento, avaliou-se a relação entre a firmeza e a atividade biológica nas 10 diferentes semanas de maturação durante o período em que os frutos se encontravam em estádios de desenvolvimento. As iluminações no mesocarpo dos frutos utilizados foram efetuadas em média 48 horas após as coletas em campo e imediatamente após a retirada da casca do fruto. A determinação da firmeza dos frutos foi realizada num intervalo de até 24 horas após a retirada do epicarpo.

No segundo momento, avaliou-se a relação entre a firmeza e a atividade biológica durante o período de senescência dos frutos, após a colheita realizada na 61ª SAF. Os frutos coletados nesse estágio foram considerados no ponto de maturação fisiológica, sendo aptos para colheita. Foram utilizados 50 frutos para esta análise. A determinação da atividade biológica e da firmeza foram inicializadas imediatamente após a retirada do epicarpo, sendo realizadas em um intervalo de 6 horas no primeiro dia e, em intervalos de 24 horas do segundo ao sétimo dia.

Os valores de firmeza atribuídos para cada fruto, em ambos momentos, foram calculados a partir da média de três leituras para cada fruto, em cada instante de análise.

#### **3.4.4. Análise dos dados**

No primeiro momento de análise, o qual avaliou-se a relação entre atividade biológica e firmeza dos frutos de macaúba durante o processo de maturação, foi realizada uma análise da relação da firmeza e da atividade biológica do conjunto total de frutos com o número de semanas após a florada onde ocorreram colheitas. Foi utilizada um modelo de regressão linear simples para descrever o comportamento das variáveis firmeza e da atividade biológica ao longo do tempo. Foram testadas a significância dos modelos ajustados a um nível de significância de 5%.

Ainda no primeiro momento de análise, foi aplicado o coeficiente de Pearson para avaliar o grau de associação entre a atividade biológica e a firmeza em cada cacho. Com base na classificação proposta por Cohen (1988), cachos que apresentaram coeficiente superior a 0,50 foram considerados com forte associação entre as variáveis. Cachos que apresentaram coeficiente entre 0,49 e 0,30 foram considerados com associação moderada, enquanto que cachos com coeficiente abaixo de 0,29 foram considerados com baixa associação entre as variáveis.

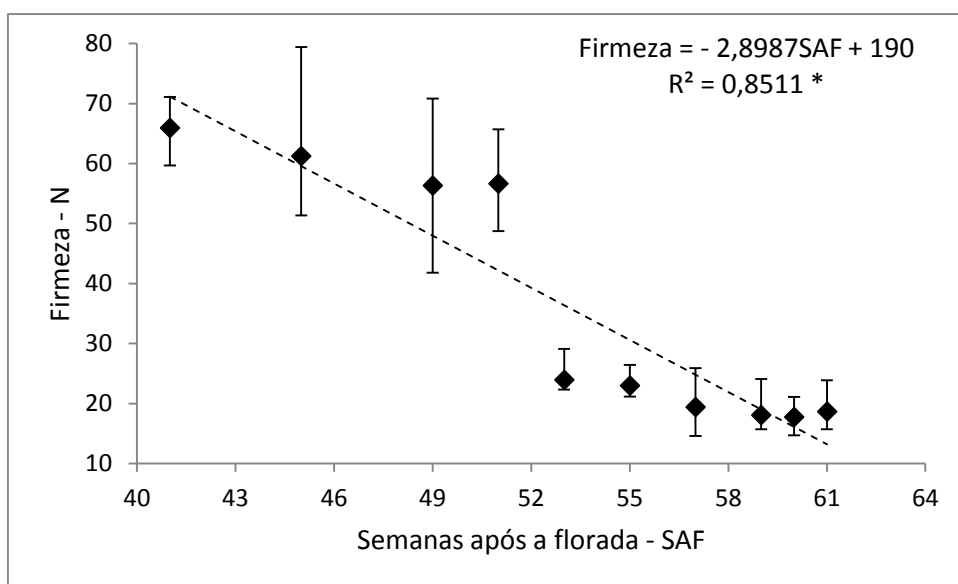
Uma vez verificada o grau de associação entre atividade biológica e a firmeza em cada cacho foi calculado o coeficiente de correlação de Pearson entre a média da firmeza do mesocarpo dos frutos e da atividade biológica de cada época de colheita.

No segundo momento de análise, o qual avaliou-se a relação entre atividade biológica e firmeza da macaúba durante o período de senescência após a colheita dos frutos na 61ª SAF, foi realizada uma análise da relação da firmeza e da atividade biológica de nas primeiras 24 horas por meio de um modelo de regressão de segunda ordem. A correlação entre firmeza e da atividade biológica de nas primeiras 24 horas foi verificada por meio do coeficiente de correlação de Pearson a um nível de significância de 5%. Foi ainda analisada relação da firmeza e da atividade biológica de nos sete dias de senescência por meio de um modelo de regressão linear simples e a correlação entre firmeza e da atividade biológica neste período.

### 3.5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.5.1. Relação entre atividade biológica e firmeza da macaúba durante a maturação

Na Figura 3.1, é apresentado a resposta média da firmeza do conjunto total de frutos. Observou-se uma tendência de redução da firmeza durante o período de maturação analisado descrita por uma função de regressão linear, a qual apresentou um  $R^2$  de 0,85. Foi possível identificar dois grupos de estádios de maturação específicos a partir dos valores firmeza. O primeiro estágio compreendido entre a 41° e a 51° SAF apresentou valores de firmeza entre 79-44N. Já o segundo estágio compreendido entre 53° e a 55° SAF apresentou valores de firmeza entre 29-14N. Ressalta-se que valores compreendidos entre 20-14N foram encontrados em frutos colhidos após a 57° SAF, ou seja, mais próximos do período de maturação fisiológica.



**Figura 3.1.** Relação linear entre a firmeza dos frutos de macaúba e as semanas após a florada. Ajuste significativo a um nível de 5%

A redução da firmeza do mesocarpo de frutos durante o processo de maturação está diretamente ligada as mudanças na composição dos açúcares simples que compõem os polissacarídeos e na solubilização das substâncias pécicas constituintes da parede celular, resultando em alterações nas estruturas celulares e no consequente amolecimento do mesocarpo (ANTHON et al., 2002; SILVA et al., 2009). Assim como a resposta observada para os frutos de macaúba, outros trabalhos confirmam a

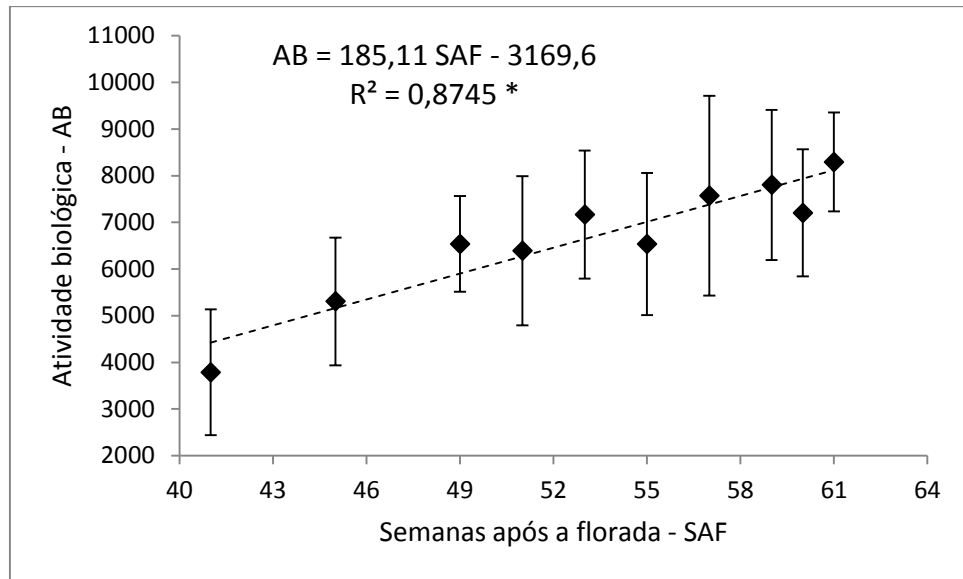
tendência de redução nos valores de firmeza ao longo da maturação de frutos devido as alterações nas estruturas celulares durante a maturação dos frutos (ANSOLINI, 2004; PINTO et al., 2013; STANGER et al., 2014).

A identificação de dois estádios de maturação específicos a partir dos valores de firmeza, antes e depois da 52°SAF, demonstra que a medida que o fruto se aproxima da maturação fisiológica ocorre uma queda acentuada no teor de pectina devido ao aumento do grau de solubilização do polímero péctico, o que reduz a força de coesão entre as células e gera o amaciamento dos tecidos. A decomposição de outros componentes da parede celular como a celulose e hemicelulose, a hidrólise do amido e a redução no grau de hidratação, são fatores que também ocorrem em estádios de maturação avançados e estão associados ao grau de firmeza da polpa dos frutos.

Montoya (2013) demonstrou o comportamento da degradação do amido a partir da hidrólise na macaúba ao longo da maturação. Nesse trabalho, observou-se um decréscimo acentuado nos teores de amido a partir da 38°SAF, sendo que a partir da 51° SAF os teores de amido atingem valores mínimos.

A degradação do amido em sólidos solúveis acarreta em aumento da concentração de açúcares solúveis na polpa em relação à casca, criando um gradiente de potencial osmótico entre polpa e casca, ocasionando a migração de água da casca para polpa, resultando em seu amolecimento (CHITARRA e CHITARRA, 2005). Sendo assim, a redução dos teores de amido nos frutos de macaúba durante a maturação também pode ser um fator que explique a redução da firmeza apresentada na Figura 3.1.

Já a partir da avaliação da atividade biológica mensurada pelo *biosepckle laser*, apresentada na Figura 3.2, observou-se uma tendência de aumento na atividade biológica ao longo do período de maturação analisado. A relação linear entre atividade biológica e SAF apresentou um  $R^2$  de 0,875, gerando um modelo significativo a 5% para estimar o período de maturação dos frutos em função da atividade biológica.



**Figura 3.2.** Relação linear entre a atividade biológica dos frutos de macaúba e as semanas após a florada. Ajuste significativo a um nível de 5%

O aumento gradual da atividade biológica (Figura 3.2) pode ser atribuído a movimentação intracelular celular que se torna mais intensa com a maturação do fruto, gerando um aumento no volume das células devido ao processo de troca osmótica de água mais intensa entre a polpa e a casca e acúmulo de carboidratos e ácidos orgânicos (CHITARRA e CHITARRA, 2005).

A atividade biológica mensurada pela técnica do *biospeckle* é resultado das variações físico-químicas ocorridas no interior das células durante o desenvolvimento do fruto. Essas variações são ocasionadas pela atividade metabólicas, enzimáticas e respiratórias que ocorrem durante o processo de maturação (ZDUNEK e CYBULSKA, 2011; BRAGA et al., 2012; ALVES et al., 2013).

Hashim et al. (2013) e Chargot et al. (2012) relatam que a redução no teor de clorofila durante o processo de maturação dos frutos também contribui para o aumento da atividade biológica mensurada pelo *biospeckle*, uma vez que com a degradação do pigmento fotossintético ocorre menor absorção de luz pela célula, gerando um espalhamento mais intenso da luz refletida. Durante o processo de maturação dos frutos, como a macaúba, os pigmentos fotossintéticos diminuem a medida que ocorre o amadurecimento (DOMINGUES et al.2001; LIMA et al. 2002).

Desta forma, a hipótese de que ocorra uma redução no teor de clorofila em estádios avançados de maturação dos frutos de macaúba deve ser considerada como

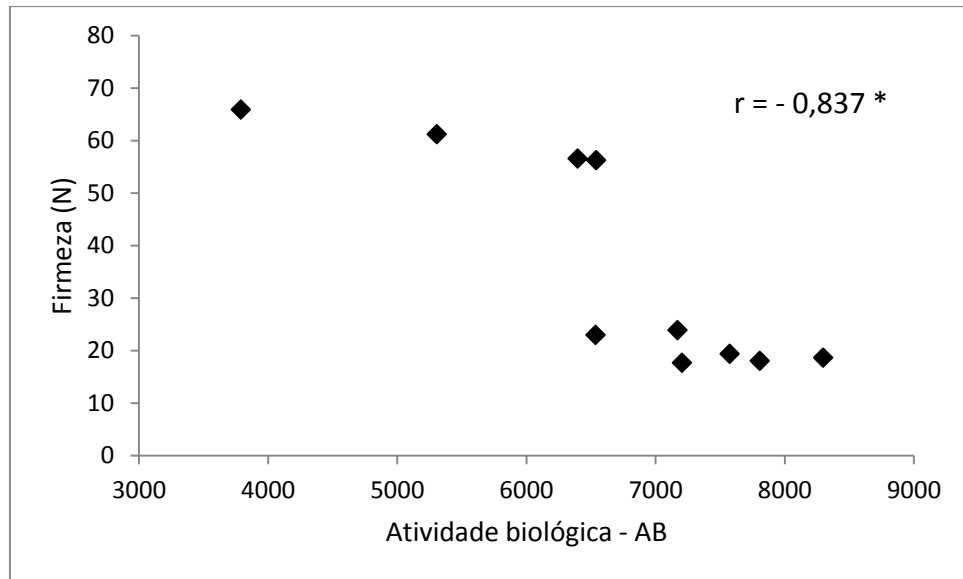
um dos fatores responsáveis pelo aumento da atividade biológica obtida pelo *biospeckle laser*.

A partir dos valores médios do conjunto total de frutos, avaliou-se a correlação das variáveis, atividade biológica e firmeza, nos grupos de frutos colhidos de cada árvore individualmente (Tabela 3.2). Observou-se para todos os grupos de frutos, uma correlação inversa, onde o aumento da atividade biológica indicou uma redução na firmeza. Com base na proposta de análise do grau de correlação de Cohen (1988), constatou-se que 5% dos cachos amostrados apresentaram uma correlação abaixo de 0,30. Já 20% dos cachos apresentaram um coeficiente de correlação entre 0,31 e 0,49 indicando uma correlação moderada, enquanto que, 75% apresentaram um coeficiente de correlação maior que 0,50 indicando forte correlação entre as variáveis analisadas.

**Tabela 3.2.** Correlação da atividade biológica e firmeza para cada árvore avaliada

	<b>Correlação</b>	<b>p -value</b>		<b>Correlação</b>	<b>p -value</b>
<b>Cacho1</b>	-0,623	0,0988	<b>Cacho11</b>	-0,594	0,1205
<b>Cacho2</b>	-0,665	0,0358	<b>Cacho12</b>	-0,626	0,0023
<b>Cacho3</b>	-0,781	0,0131	<b>Cacho13</b>	-0,581	0,1007
<b>Cacho4</b>	-0,364	0,4271	<b>Cacho14</b>	-0,839	0,0093
<b>Cacho5</b>	-0,793	0,0115	<b>Cacho15</b>	-0,719	0,0290
<b>Cacho6</b>	-0,370	0,3669	<b>Cacho16</b>	-0,126	0,7470
<b>Cacho7</b>	-0,522	0,1215	<b>Cacho17</b>	-0,306	0,3897
<b>Cacho8</b>	-0,386	0,2703	<b>Cacho18</b>	-0,517	0,1259
<b>Cacho9</b>	-0,903	0,0024	<b>Cacho19</b>	-0,762	0,0170
<b>Cacho10</b>	-0,723	0,0160	<b>Cacho20</b>	-0,642	0,0454

A correlação significativa entre as médias da firmeza do mesocarpo dos frutos de macaúba e atividade biológica mensurada pelo *biospeckle* em cada semana após a florada de -0,837 (Figura 3.3), permitiu concluir que em termos gerais, o aumento da atividade biológica foi associado a redução da firmeza dos frutos de macaúba.



**Figura 3.3.** Correlação entre as médias firmeza dos frutos e atividade biológica dos frutos de macaúba mensurada pelo *biospeckle laser* em cada semana após a florada. Significância a um nível de 5% (\*)

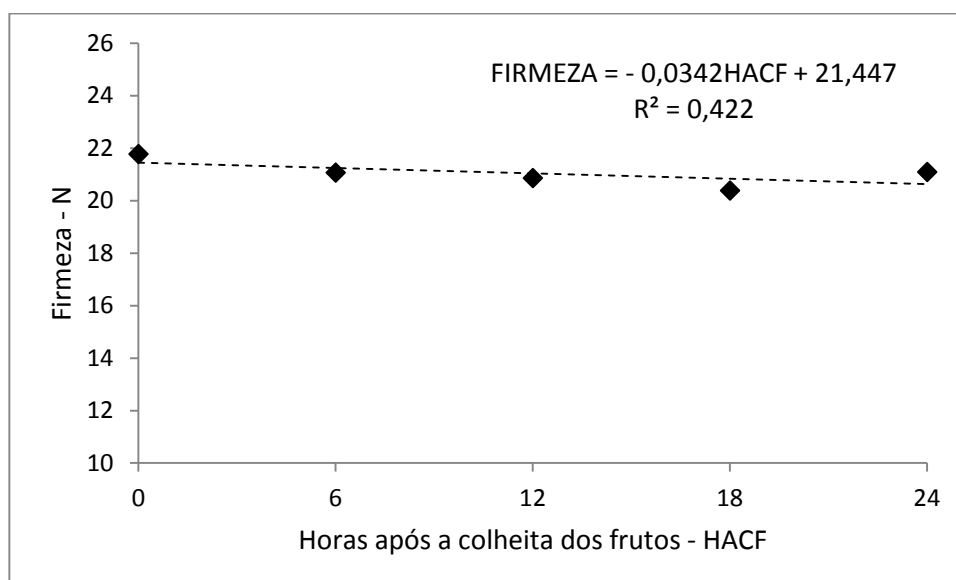
Durante a maturação do fruto, o aumento no volume celular e nos espaços intracelulares, um dos fatores responsáveis pela redução da firmeza do fruto, gera um aumento na atividade medida pelo *biospeckle* devido à variação no espelhamento da luz não absorvida pelo material (ZDUNEK e HERPPICH, 2012). Além disso, como já discutido, a degradação do amido em sólidos solúveis durante a maturação dos frutos de macaúba está diretamente ligada a redução da firmeza e a atividade biológica.

Por outro ponto de vista, a correlação das variáveis pode ser analisada sobre o aspecto do possível efeito climatérico nos frutos de macaúba (GOULART, 2014). Uma das características de frutos climatéricos é o acréscimo acentuado da taxa respiratória durante a fase de amadurecimento, o que propicia um aumento nas atividades metabólicas, dentre elas a produção de etileno que é um dos agentes causadores do amolecimento da polpa de frutos (CHITARRA e CHITARRA, 2005; PINTO et al., 2013; TREVISAN et al., 2013). Assim, o aumento da atividade biológica e a redução da firmeza da polpa observados ao longo do desenvolvimento dos frutos e de forma mais acentuada nos estádios finais de amadurecimento também pode ser visto como um indicativo do efeito climatérico nos frutos reforçando a hipótese de trabalhos anteriores.

### 3.5.2. Relação entre atividade biológica e firmeza da macaúba durante o período de senescência após a maturação fisiológica do fruto

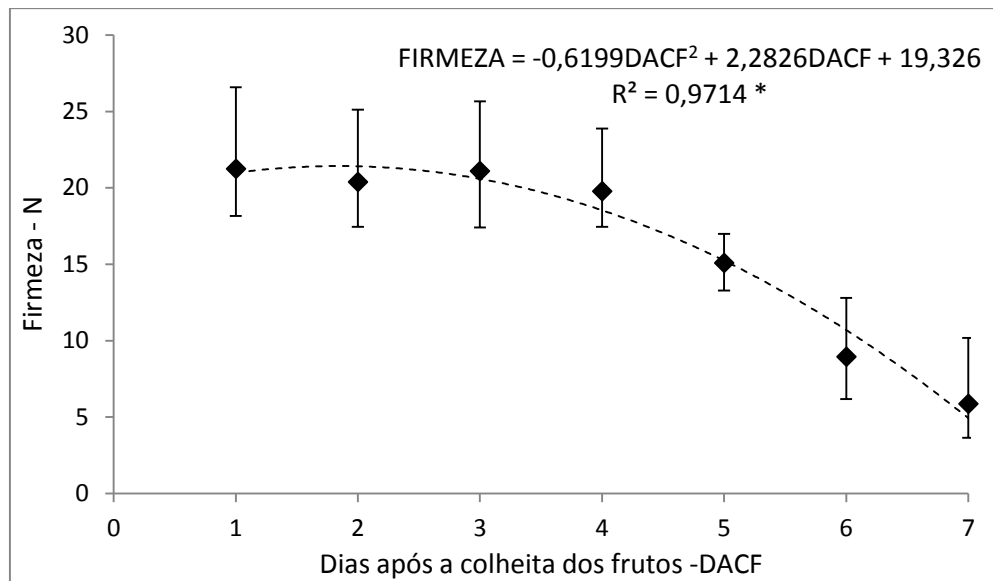
A firmeza é um importante parâmetro da qualidade também durante a fase de pós-colheita dos frutos, uma vez que sua redução na etapa de pós-colheita e armazenamento dos frutos está associada a uma elevada desidratação, incidência de podridões e de distúrbios fisiológicos (KLUGE et al., 2010; STANGER et al., 2014).

Na Figura 3.4, é apresentado a resposta média da firmeza para o grupo de frutos de macaúba avaliados durante 24 horas após a colheita. O ajuste da regressão linear não significativo indicou que os valores de firmeza mensurados não variaram em função do tempo das análises nas primeiras 24 horas após a colheita de campo.



**Figura 3.4.** Relação linear entre a firmeza dos frutos de macaúba e as primeiras 24 horas de senescência após a colheita na 61ª SAF (HACF). Ajuste não significativo a um nível de 5%

Ao observar a Figura 3.5 podemos notar uma variação nos valores de firmezas mais acentuadas a partir do quarto dia, o que considerar que as alterações determinantes para a qualidade dos frutos podem ocorrer de forma mais severas a partir deste período. O escurecimento visual da polpa devido a reações oxidantes oriundas do contato direto entre polpa e atmosfera também foi um indicativo nítido do grau de deterioração do fruto, a partir do terceiro dia.



**Figura 3.5.** Relação de segunda ordem entre a firmeza dos frutos de macaúba e os sete dias de senescência após a colheita na 61ª SAF (DACF). Ajuste significativo a um nível de 5%

Durante a fase de senescência dos frutos, o etileno e os ácidos abscísico atuam juntamente com enzimas degradativas que gradualmente reduzem a capacidade fisiológica das células gerando processos catabólicos, desidratação celular, devido a processos oxidativos e invasão acentuada de microorganismos (SAQUET e STREIF, 2002; CHITARRA e CHITARRA, 2005; LEITE et al. 2012). Desta forma, a perda de firmeza na polpa de frutos está relacionada principalmente com o aumento da produção de etileno.

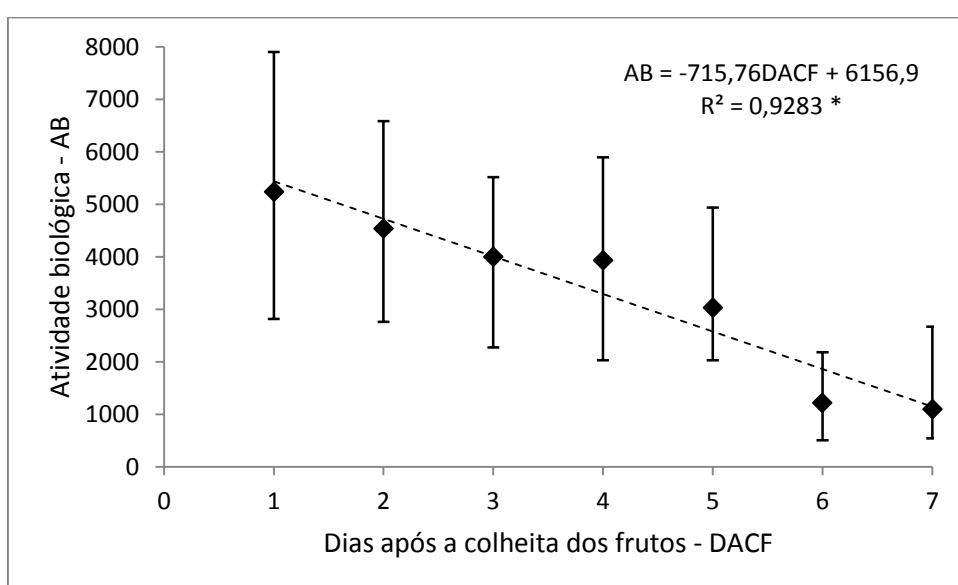
Assim, pode-se sugerir como hipótese que o efeito do etileno é um dos principais responsáveis pela queda nos valores de firmeza da polpa dos frutos de macaúba, atuando de forma acentuada a partir do quarto dia após a coleta dos frutos.

Kohatsu et al.(2011) demonstraram que a firmeza da polpa de frutos de cajá sofreu uma redução significativa no terceiro dia de senescência com o fruto armazenado a 25°C, temperatura próxima a que encontravam os frutos de macaúba utilizados no experimento (22 °C). Os autores ainda relataram que o armazenamento em temperaturas abaixo de 10°C retarda o processo degradativo dos frutos, permitindo que a firmeza da polpa se mantenha sem variações significativas até 6 dias.

Outros autores também atestam a influência da temperatura no processo degradativo de frutos durante a fase de armazenamento e senescência (KLUGUE et al. 2010; COSTA et al., 2012). Assim, é possível concluir que além da produção de etileno

durante a fase de senescência, a temperatura ambiente do local onde foram armazenados os frutos de macaúba durante o experimento, poderá ter influenciado nos processos fisiológicos contribuindo para a redução da firmeza após o terceiro dia.

A atividade biológica mensurada pela técnica do *biosepckle laser* demonstrou ser um parâmetro indicativo da degradação do fruto de macaúba, se reforçando o potencial da técnica na avaliação da qualidade de frutos. A resposta da atividade biológica acompanhou a tendência de redução da firmeza da polpa dos frutos ao longo dos dias de armazenamento, apresentando uma relação linear com o período avaliado (Figura 3.6).

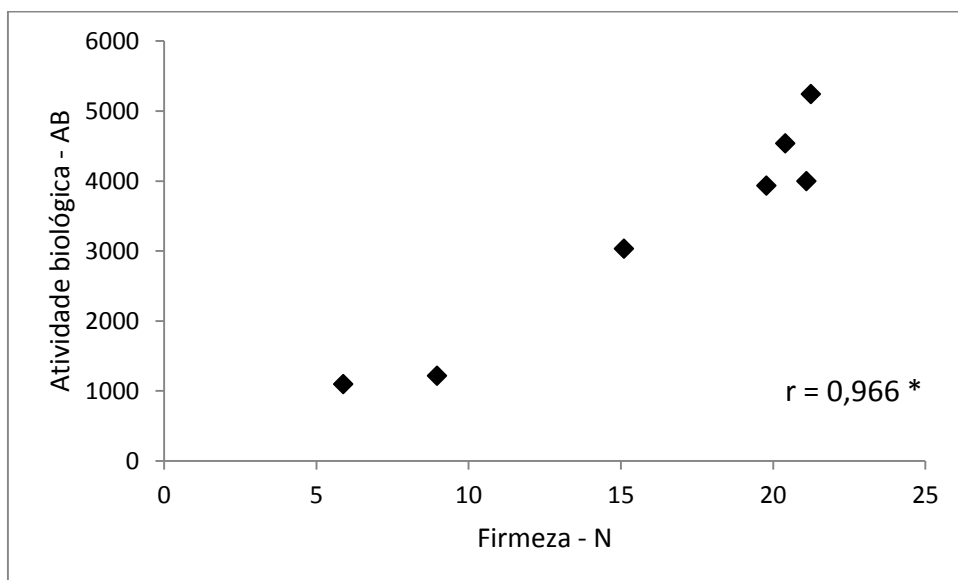


**Figura 3.6.** Relação linear entre a atividade biológica dos frutos de macaúba e os sete dias de senescência após a colheita na 61ª SAF (DACF). Ajuste significativo a um nível de 5%

O uso da técnica do *biospeckle laser* como indicador da atividade biológica associada a qualidade e senescência de vegetais pode ser encontrado em trabalhos que utilizam variáveis como sólidos solúveis, acidez titulável, firmeza e tempo de armazenamento como parâmetros comparativos (ANSARI e NIRALA, 2013; ZDUNEK et al., 2014). Fisicamente, a luz laser absorvida pelo tecido vegetal durante a iluminação para geração do fenômeno do *biospeckle* está relacionada com os constituintes químicos do fruto como pigmentos, açúcar e água (WILLIAMS e NORRIS, 2001). Desta forma, com a degradação dos frutos e a alteração nos

constituintes químicos, é justificável a redução na atividade biológica medida pelo *biosepckle laser*.

A correlação entre atividade biológica e a firmeza do mesocarpo na senescência dos frutos após a colheita da 61ª SAF, foi comprovada pela significância do coeficiente a um nível de 5% (Figura 3.7).



**Figura 3.7.** Correlação entre as médias firmeza dos frutos e atividade biológica dos frutos de macaúba mensurada pelo *biospeckle laser* em cada dia após a colheita na 61ª SAF. Significância a um nível de 5% (\*)

Uma vez que a redução da firmeza durante a senescência na pós-colheita ocorre devido a degradação da parede celular e consequente perda de água por parte do fruto, a redução na atividade biológica observada para os frutos de macaúba se torna um indicativo contundente da perda de qualidade durante os dias após colheita. Relação similar obtida para macaúba entre os parâmetros atividade biológica e firmeza da polpa pode ser observado em trabalhos com morangos (MULONE et al., 2013), maçãs (QING et al., 2008; ZDUNEK e HERPPICH, 2012) e cenouras (ALVES et al., 2013).

### 3.6. CONCLUSÕES

Os valores médios das variáveis atividade biológica, mensurada pelo *biospeckle laser*, e firmeza durante o desenvolvimento dos frutos de macaúba apresentaram correlação significativa ( $R^2 = -0,837$ ) onde o aumento da atividade biológica foi associada a redução da firmeza dos frutos de macaúba.

A atividade biológica e a firmeza durante a fase de armazenamento após os frutos terem atingidos a maturação fisiológica, apresentaram correlação significativa ( $r = 0,966$ ), onde a redução da atividade biológica foi associada a redução da firmeza dos frutos de macaúba.

A firmeza da polpa não apresentou variação significativa nas primeiras 24 horas após a colheita. Apesar da constante tendência de queda observou-se que as variações nos valores de firmezas sofreram reduções acentuadas a partir do quarto dia após a colheita.

Visto o alto grau de associação da atividade biológica e da firmeza da polpa em diferentes instantes de maturação dos frutos, a técnica ótica do *biospeckle laser* pode ser um eficiente indicador não invasivo e não destrutivo do grau de maturação dos frutos de macaúba auxiliando na determinação do momento de colheita.

### 3.7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABOUDAOU, I., FAIZ, B., AASSIF, E., MOUDDEN, A., IZBAIM, D., ABASSI, D., AZERGUI, M. The maturity characterization of orange fruit by using high frequency ultrasonic echo pulse method. **In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**.v.42, n.1, 12-38p.2012.

AGUIAR, R. L.; SCALOPPI, E. M.; SPÓSITO, M. B. Período de incubação de *Guignardiacitricarpa* em diferentes estádios fenológicos de frutos de laranjeira 'Valência'. **Tropical Plant Pathology**, v. 37, n. 2, p. 155-158, 2012.

ALVES, J. A.; BRAGA, R. A.; VILAS BOAS, E. V. B. Identification of respiration rate and water activity change in fresh-cut carrots using *biospeckle laser* and frequency approach. **Postharvest Biology and Technology**, v. 86, p. 381-386, 2013.

AMARAL, I. C.; BRAGA, R. A., RAMOS, E. M., RAMOS, A. L. S.; ROXAEL, E. A. R. Application of biospeckle laser technique for determining biological phenomena related to beef aging. **Journal of Food Engineering**, v. 119, n. 1, p. 135-139, 2013.

ANSARI, M. D.; NIRALA, A. K. Biospeckle activity measurement of Indian fruits using the methods of cross-correlation and inertia moments. **International Journal for Light and Electron Optics**, v. 124, n. 15, p. 2180-2186, 2013.

ANTHON, G. E.; SEKINE, Y.; WATANABE, N. Thermal inactivation of pectin methylesterase, polygalacturonase, and peroxidase in tomato juice. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v.50, p.6153- 6159, 2002.

AZZOLINI, M.; JACOMINO, A. P.; BRON, I. U. Índices para avaliar qualidade pós-colheita de goiabas em diferentes estádios de maturação. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 39, n. 2, p. 139-145, 2004.

BRAGA, R. A.; CARDOSO, R. R.; BEZERRA, P. S.; WOUTERS, F.; SAMPAIO, G. R.; VARASCHIN, M. S. Biospeckle numerical values over spectral image maps of activity. **Optics Communications**, v. 285, p. 553-561, 2012.

CARDOSO, R. R.; COSTA, A.G.; NOBRE, C. M. B.; BRAGA, R. A. Frequency signature of water activity by biospeckle laser. **Optics Communications**, Amsterdam, v. 284, n. 8, p. 2131-2136, 2011.

CARDOSO, R. R.; BRAGA, R. A. Enhancement of the robustness on dynamic speckle laser numerical analysis. **Optics and Lasers in Engineering**, v. 63, p. 19-24, 2014.

CHARGOT, M. S.; ADAMIAK, A.; ZDUNEK, A. Pre-harvest monitoring of apple fruits development with the use of biospeckle method. **Scientia Horticulturae**, 145, 23-28, 2012.

CHITARRA, M. I. F.; CHITARRA, A. B. Pós-colheita de frutos e hortaliças: fisiologia e manuseio. **2º ed. Lavras: UFLA**, 785 p. 2005.

COHEN, J. Statistical power analysis for the behavioral sciences. Hillsdale, NJ, **Erlbaum**. 1988.

COSTA, L. M., RESENDE, O., GONÇALVES, D. N., & SOUSA, K. A. Qualidade dos frutos de crambe durante o armazenamento. **Revista Brasileira de Sementes**, v. 34, n. 2, p. 239-301, 2012.

DOMINGUES, M. C. S.; ONO, E. O.; RODRIGUES, J. D. Indução do amadurecimento de frutos cítricos em pós-colheita com a aplicação de ethephon. **Revista Brasileira Fruticultura. Jaboticabal - SP**, v. 23, n. 3, p. 555-558. 2001.

FARIAS, J. F. D.; ARAÚJO NETO, S. E. D.; ÁLVARES, V. D. S.; FERRAZ, P. A.; FURTADO, D. T.; SOUZA, M. L. D. Maturation and determination of the harvest point of envira-caju fruit. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v.33, n.3, 730-736p., 2011.

FELLMAN, J. K.; RUDELL, D. R.; MATTINSON, D. S.; MATTHEIS, J. P. Relationship of harvest maturity to flavor regeneration after CA storage of 'Delicious' apples. **Postharvest Biology and Technology**, v.27, n.1, 39-51p. 2003.

FREIRE, E. C. B. S.; SILVA, F. V. G.; SANTOS, A. F.; MEDEIROS, I. F. Avaliação da qualidade de ciriguela (*Spondiaspurpurea*, L) em diferentes estádios de maturação. **Revista Verde, Mossoró**, v.6, n.2, p. 27-40, 2011.

GODINHO, R.P.; SILVA, M. M.; NOZELA, J.R.; BRAGA, R.A. Online biospeckle assessment without loss of definition and resolution by motion history image. **Optics and Lasers in Engineering**, v. 50, p. 366-372, 2012.

GOULART, S.M. Amadurecimento pós-colheita de frutos de macaúba e qualidade do óleo para a produção de biodiesel. **Dissertação**. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2014. 66p.

HASHIM, N.; PFLANZ, M.; REGEN, C.; JANIUS, R. B.; RAHMAN, R. A., OSMAN, A. SHITAN, M.; ZUDE, M. An approach for monitoring the chilling injury appearance in bananas by means of backscattering imaging. **Journal of Food Engineering**, v. 116, n. 1, p. 28-36, 2013.

KLUGE R.A.; PICOLI A.A.; AGUILA J.S. Respiração e produção de etileno em beterrabas inteiras e minimamente processadas submetidas a tratamentos com etileno e biorreguladores. **Horticultura Brasileira**, v.28, p. 54-57, 2010.

KOHASTU, D.S.; ZUCARELI, V.; BRAMBILLA, W.P.; EVANGELISTA, R.M. Qualidade de frutos de cajá-manga armazenado sob diferentes temperaturas. **Revista Brasileira de Fruticultura**. V. Especial, p. 344-349, Outubro, 2011.

LEITE, G. A., CARVALHO, C. C. A. C. D., FREITAS, W. E. D. S., DANTAS, J. I. A., PONTES, C. A., & FERNANDES, P. L. D. O. A ação das poliaminas na maturação e senescência de frutos. **Agropecuária científica no semiárido**, v. 8, n. 4, p. 08-21, 2012.

LIMA, V. L. A. G.; MÉLO, E. A.; LIMA, D. E. S. Fenólicos e carotenóides totais em pitanga. **Scientia Agricola**, v.59, n.3, p. 447-450. 2002.

MANICA, I.; ICUMA, I.M.; JUNQUEIRA, N.T.V.; SALVADOR, J.O.; MOREIRA, A.; MALAVOLTA, E. Fruticultura tropical. Editora Cinco continentes. 373p. Porto Alegre, Rio Grande do Sul, 2000.

MONTOYA, S.G. Caracterização do desenvolvimento do fruto da palmeira macaúba. **Dissertação**. Universidade Federal de Viçosa, 51p. 2013.

MOTOIKE, S.J.; CARVALHO, M.; PIMENTEL, L.D.; KUKI, K.N.; PAES, J.M.V.; DIAS, H.C.T.; SATO, A.Y. A cultura da macaúba: implantação e manejo de cultivos racionais. **Editora UFV**.p.61. Viçosa , Minas Gerais, 2013.

MULONE, C.; BUDINI, N.; VINCITORIO, F. M.; FREYRE, C., DÍAZ, A. L.; REGO, A. R. Analysis of strawberry ripening by dynamic speckle measurements. **In: 8th Ibero American Optics Meeting/11th Latin American Meeting on Optics, Lasers, and Applications. International Society for Optics and Photonics**, p. 87851-87851-6. 2013.

LORENZI, G. M. A. C., PIMENTEL, L. D., DE PAULA, S. R., NEGRELLE, R. R. B., & PAES, J. M. V. Prospecção da cadeia produtiva dos frutos da palmeira macaúba no estado de Minas Geais. **Informe Agropecuário- EPAMIG**. Belo horizonte. v.32, n.265., p.41-51, 2011.

MILANI, M. Cultivo da mamona. Embrapa Algodão. **2ª Ed.** Campina Grande, 2006.

OULOMARA, G.; TRIBILLON, J.; DUVERNOY, J. Biological activity measurements on botanical specimen surfaces using a temporal the correlation effect of laser speckle. **Journal of Moderns Optics**, v. 36, n. 2, p. 136-179, Feb. 1989.

PAJUELO, M. BALDWIN, G., RABAL, H., CAP, N., ARIZAGA, R.; TRIVI, M. Bio-speckle assessment of bruising in fruits. **Optics and Lasers Engineering**, v. 40, n. 2, p.13-24, 2003.

PEREIRA, G.S.; MACHADO, F.L.C.; COSTA, J.M.C.; Aplicação de recobrimento prolonga a qualidade pós-colheita de laranja ‘Valência Delta’ durante armazenamento ambiente. **Revista Ciência Agronômica**, v. 45, n. 3, p. 520-527, 2014.

PINTO, P. M.; JACOMINO, A. P.; SILVA, S. R.; ANDRADE, C. A. W. Ponto de colheita e maturação de frutos de camu-camu colhidos em diferentes estádios. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 48, n. 6, p. 605-612, 2013.

QING, Z.; JI, B.; ZUDE, B. Non-destructive analyses of apple quality parameters by means of laser-induced light backscattering imaging. **Postharvest Biology and Technology**, Berlin, v. 48, n. 2, p. 215-222, 2008.

RABAL, H. J.; ARIZAGA, R.; CAP, N. L.; GRUMEL, E.; TRIVI, M. Numerical model for dynamic speckle: an approach using the movement of the scatterers. **Journal of Optics**, v. 5, n. 5, p. 381, 2003.

ROMERO, G. G.; MARTINEZ, C. C.; ALANÍS, E. E.; SALAZAR, G. A.; BROGLIA, V. G.; ÀLVARES, L. Bio-speckle activity applied to the assessment of tomato fruit ripening. **Biosystems engineering**, v. 103, n. 1, p. 116-119, 2009.

SANTOS, F. L.; QUEIROZ, D. M.; PINTO, F. A. C.; RESENDE, R. C. Efeito da frequência e amplitude de vibração sobre a derriça de frutos de café. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.14, n.4, 425-431p. 2010.

SAQUET, A. A.; STREIF, J. Respiração e produção de etileno de maçãs armazenadas em diversas concentrações de oxigênio. **Current Agricultural Science and Technology**, v. 8, n. 1, 2012.

SILVA, P. A.; ABREU, C. M. P.; CORREA, A. D.; ASMAR, S. A. Modificações nas atividades da poligalacturonase e pectinametilesterase em morangos armazenados à temperatura ambiente. **Ciência e Agrotecnologia**, v.33, p.1953-1958, 2009.

SILVA, D. F. P.; SILVA, J. O. D. C. E.; MATIAS, R. G. P., RIBEIRO, M. R.; BRUCKNR, C. H. Growth curve and respiratory pattern of genotypes of peach fruit in subtropical region. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 35, n. 2, p. 642-649, 2013.

SOLTANI, M.; ALIMARDANI, R.; OMID, M. Prediction of banana quality during ripening stage using capacitance sensing system. **Australian Journal of Crop Science**. v.4, n.6, 443-447p. 2010.

STANGER, M. C.; STEFFENS, C. A.; AMARANTE, C. V. T.; CORRÊA, T. R.; TANAKA, H. Qualidade pós-colheita de ameixas ‘camila’ e ‘laetitia’ colhidas em diferentes estádios de maturação. **Revista Caatinga**, v. 27, n. 2, p. 214-221, 2014.

STEFFENS, C.A.; AMARANTE, C.V.T.; CHECHI, R.; SILVEIRA, J. P. G.; BRACKMANN, A. Aplicação pré-colheita de reguladores vegetais visando retardar a maturação de ameixas ‘Laetitia’. **Ciência Rural**, v.39, p.1369-1373, 2009.

TREVISAN, M. J., JACOMINO, A. P., CUNHA JUNIOR, L. C., & ALVES, R. F. Application of 1-methylcyclopropene associated with ethylene to minimize its effects in inhibition of ripening of ‘golden’ papaya. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 35, n. 2, p. 384-390, 2013.

VILELA, N. J.; LANA, M. M.; MAKISHIMA, N. O peso da perda de alimentos para a sociedade: o caso das hortaliças. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v.21, n. 2, p. 141-143, 2003.

WILLIAMS, P.; NORRIS, K. Near infrared technology in the agricultural and food industries. 2nd ed. St. Paul: American Association of Cereal Chemist, 237 p., 2001.

ZDUNEK, A.; CYBULSKA, J. Relation of biospeckle activity with quality attributes of apples. **Sensors**, v. 11, n. 6, p. 6317-6327, 2011.

ZDUNEK, A.; HERPPICH, W. B. Relation of biospeckle activity with chlorophyll content in apples. **Postharvest Biology and Technology**, v.64, n.1, p. 58-63, 2012.

ZDUNEK, A.; ADAMIAK, A.; PIECZYWEK, P. M.; KURNDA, A. The biospeckle method for the investigation of agricultural crops: A review. **Optics and Lasers in Engineering**, v. 52, p. 276-285, 2014.

## **CAPÍTULO 4**

### **USO DO BIOSPECKLE LASER PARA DETERMINAÇÃO DO PONTO DE COLHEITA DE FRUTOS DE MACAÚBA**

## 4. USO DO BIOSPECKLE LASER PARA DETERMINAÇÃO DO PONTO DE COLHEITA DE FRUTOS DE MACAÚBA

### 4.1. RESUMO

A macaúba vem ganhando destaque dentre as culturas vistas como matéria-prima de bioenergia por apresentar alta produtividade de óleo, alto poder de combustão e com baixa emissão de resíduos poluentes, atendendo a demanda mundial por fontes de energia sustentáveis. O conhecimento de novas informações sobre o momento ideal para a colheita do fruto é fundamental para que se consiga implementar o cultivo racional e sustentável em escala comercial. Os objetivos deste trabalho foram avaliar a relação entre teor de óleo e a atividade biológica mensurada pela técnica ótica do *biospeckle laser* nos frutos de macaúba em diferentes semanas de maturação, e desenvolver um classificador em função da atividade biológica para determinar o ponto de ideal para colheita dos frutos. Para a realização do experimento, foram avaliados frutos em 10 semanas de maturação diferentes. A correlação entre teor de óleo e atividade biológica foi analisada por meio do coeficiente de correlação de Pearson. Foi desenvolvida uma rede neural para classificar frutos próximos do momento de colheita em função da atividade biológica. A atividade biológica mensurada pelo *biospeckle laser* e o teor de óleo apresentaram uma correlação significativa de 0,92. De acordo com os resultados da classificação, os frutos a partir da 59ª semana após a florada foram considerados aptos para colheita apresentando os maiores níveis de teor de óleo.

**Palavras-chave:** Atividade biológica; técnica ótica; maturação.

### 4.2. ABSTRACT

#### USE BIOSPECKLE LASER FOR DETERMINATION HARVEST POINT MACAW PALM FRUITS

Macaw palm is gaining prominence among crops used as raw-material for bioenergy production for presenting high oil content, high combustion power and low emissions of polluting waste, meeting the global demand for sustainable energy sources. The knowledge of new information on the ideal time for fruit harvest is

essential for the implementation of rational and sustainable farming on a commercial scale. The aims of this study were to evaluate the relationship between oil content and biological activity measured by biospeckle laser optical technique of macaw palm fruits at different maturation weeks and to develop a classifier based on the biological activity to determine the ideal point for fruit harvesting. To conduct the experiment, fruits at 10 different maturation weeks were evaluated. The correlation between oil content and biological activity was analyzed using Pearson's correlation coefficient. A neural network was developed to classify fruits near the harvest point according to their biological activity. The biological activity measured by biospeckle laser and the oil content showed significant correlation of 0.92. According classification results, fruits at the 59th week after flowering were considered adequate for harvesting, showing the highest oil contents.

**Keywords:** Biological activity; optical technique; maturation.

### 4.3.INTRODUÇÃO

O Brasil tem destaque no cenário energético mundial sendo considerado um dos maiores produtores e consumidores de biodiesel (ANP, 2012). Apesar do avanço significativo na área, a matriz energética brasileira enfrenta gargalos na produção do biodiesel, devido a quantidade reduzida de matéria prima oleaginosa. Atualmente, a soja é a principal fonte de produção de biodiesel, cobrindo 74% da demanda de matéria-prima necessária com uma produção de 2,2 milhões de m<sup>3</sup> (ANP, 2014), sendo insuficiente para sustentar as projeções de demanda de biodiesel para os anos futuros. A ampliação e diversificação das matérias-primas utilizadas para a produção de biodiesel é fundamental para a continuação do avanço do setor bioenergético brasileiro.

Nesse contexto, a cultura da macaúba (*Acrocomia aculeata*) destaca-se principalmente pelo grande potencial produtivo que pode chegar até 24 t.ha<sup>-1</sup> de frutos, o que equivale a 4,8 t.ha<sup>-1</sup> de óleo. A macaúba é uma palmeira nativa de florestas tropicais, encontrada em abundância no cerrado brasileiro (HENDERSON et al., 1995; LORENZI et al., 20011). Outro fator que tem chamado a atenção da comunidade científica para a macaúba, é pela possibilidade de ser utilizada em consórcio com

outras espécies em sistemas agrosilvopastoril (HENDERSON et al., 1995; VIANA et al., 2011).

A fase de desenvolvimento do fruto inicia-se no final do período chuvoso e o amadurecimento ocorre durante a primavera e verão do ano seguinte, assim, a safra ocorre entre os meses de setembro e março (LORENZI, 2011; MOTA et al., 2011). O fruto é a parte de maior potencial econômico da planta. Plantas nativas podem produzir até oito cachos por planta, apresentando de 400 a 500 frutos por cacho, correspondendo a produção de 160 a 200 kg de frutos por planta (MOTOIKE, 2013). O fruto possui óleo em todas as suas partes constituintes, exceto no endocarpo, sendo que na amêndoa o teor de óleo varia de 46% a 58%, no mesocarpo pode atingir até 70% e o epicarpo possui cerca de 10% de óleo (MOTA et al., 2011). A estimativa de produtividade de óleo do mesocarpo é de 5000 kg.ha<sup>-1</sup> do tipo oleico-palmítico, necessário para a produção de biodiesel, e de 1400 kg.ha<sup>-1</sup> do óleo na amêndoa do tipo láurico, utilizado na fabricação de cosméticos (CLEMENT et al., 2005).

Embora a macaúba tenha grande potencial produtivo e sua atividade econômica extrativista seja consolidada, a exploração racional ainda é limitada visto que a macaúba apresenta algumas características que dificultam sua implementação em um sistema de produção em larga escala, como a sazonalidade e maturação irregular dos frutos (MOTA et al., 2011; MOTOIKE et al., 2013). Devido à variação no grau de maturação dos frutos entre árvores e cachos, são realizadas diversas colheitas durante a safra, o que demanda aumento de mão de obra e custo na produção, além do que reflete diretamente na quantidade e qualidade do óleo.

Atualmente, na exploração extrativista da macaúba, a operação de colheita é iniciada a partir do desprendimento natural dos frutos de seus respectivos cachos. O fruto em contato com o solo fica sujeito à ação de microorganismos que provocam deterioração da polpa, o que eleva a acidez e reduz a quantidade e qualidade de óleo (HIANE et al., 2005).

O processamento dos frutos colhidos para a extração do teor de óleo deve ser realizado o mais breve possível, pois, por ser oleaginosos, a medida que os frutos se degradam, a acidez do óleo aumenta comprometendo sua qualidade.

Um dos principais métodos analítico utilizados para estimar o teor de óleo em frutos de macaúba é o ASE (*Accelerated Solvent Extraction*) que usa uma combinação de temperatura e pressão e utilização de um solvente para a extração de óleo. No entanto, este método é considerado trabalhoso, e requer a destruição do fruto durante

o processo utilizando uma proporção substancialmente grande da amostra para realização da análise (ELFADL et al., 2010). O uso da ressonância magnética reduziu significativamente o tempo gasto nas análises, porém devido a vários aspectos, este método requer uma prévia preparação das amostras, o que dificulta o uso desta tecnologia (PANFORD e DEMAN, 1990).

Matsimbe et al. (2015) utilizaram a espectroscopia do infravermelho e infravermelho próximo (VIS-NIR) aplicada no mesocarpo do fruto de macaúba para estimar o teor de óleo de macaúba. No entanto, o ajuste do modelo VIS-NIR com dados de reflectância obtidos no epicarpo dos frutos não apresentaram resultados significativos.

A instrumentação ótica vem sendo aplicada como alternativa para classificação e controle de qualidade de frutos e vegetais, com o uso de dados espectrais de refletância (JUNKWON et al., 2009; SAAED et al., 2012), avaliação por tomografia e raios-x (ABDULLAH et al., 2004; MARCONE et al., 2013), utilização de sensores fluorescentes para a determinação da maturação (CEROVIC et al., 2008; HAZIR et al., 2012) e o uso do *biospeckle laser* para quantificação e monitoramento da atividade biológica (RABELO et al., 2005; ZDUNEK e HERPPICH, 2012; ALVES et al., 2013).

A técnica do *biospeckle laser* apresenta vantagens em relação as técnicas óticas tradicionais por ser de relativa simples aplicação e de baixo custo para a montagem do aparato experimental (RABAL e BRAGA, 2008; ZDUNEK et al., 2014). As imagens padrões do *biospeckle* são formadas quando um material biológico é iluminado pela luz laser, gerando a formação de uma figura de interferência devido ao espalhamento provocado pela disposição estrutural dos tecidos celulares.

Observado ao longo do tempo, os padrões de interferência serão dinâmicos, uma vez que a atividade dos tecidos celulares acarreta em uma variação no espalhamento da luz refletida. Desta forma, a intensidade de atividade do padrão do *biospeckle* está associada com as propriedades dinâmicas do material analisado.

Os padrões de *biospeckle* obtidos a partir da atividade biológica do material podem ser correlacionados com níveis de maturação (CHARGOT et al., 2012), deterioração (HASHIM et al., 2013), crescimento (RIBEIRO et al., 2013), quantidade de água (ALVES et al., 2013), efeito de temperatura (KURENDA et al., 2012), dentre outros

Os objetivos deste trabalho foram avaliar a relação entre teor de óleo e a atividade biológica mensurada pela técnica ótica do *biospeckle laser* nos frutos de macaúba em diferentes semanas de maturação, e desenvolver um classificador em função da atividade biológica para determinar o ponto de ideal para colheita dos frutos.

#### **4.4. MATERIAIS E MÉTODO**

##### **4.4.1. Coleta dos frutos**

Os frutos utilizados no experimento foram coletados em uma área localizada no município de Acaiaca, situado na Zona da Mata Mineira a 20° 23' 33'' de latitude Sul e 47° 07' 31'' de longitude Oeste, com altitude média de 601 m. As árvores utilizadas foram da espécie *Acrocomia aculeata*, com mais de 10 anos, em estágio reprodutivo, sendo cultivadas em um sistema extrativista, sem fins comerciais e sem nenhum tratamento prévio do solo.

Para a coleta dos frutos, foram escolhidas plantas que apresentaram aspecto físico saudável, sem doenças visíveis e sem ataque de pragas ou predadores. Durante o início do florescimento, foram demarcadas de forma aleatória um cacho em cada árvore. Após o período da florada, sendo selecionados para o experimento 20 cachos contidos em 20 árvores distintas.

Foram realizadas 10 coletas de frutos entre a 40<sup>a</sup> e a 61<sup>a</sup> semana após a florada (SAF), período compreendido entre Setembro de 2013 à Fevereiro de 2014. Em cada coleta, foram adquiridos 100 frutos, sendo o universo amostral composto de 5 frutos por cacho. Os cachos foram agrupados de forma que, em cada coleta, os frutos apresentaram idades próximas.

O número total de frutos avaliados em cada estágio de maturação sofreu variações devido à redução no número de frutos em cachos específicos provocada por intempéries naturais e o abortamento de alguns cachos durante o período do experimento (após a 57<sup>a</sup> SAF).

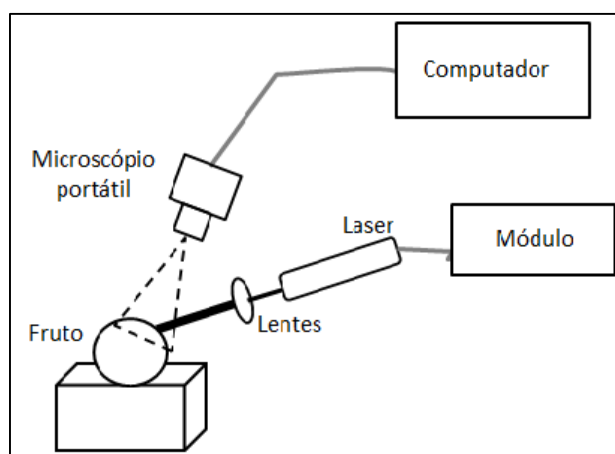
Os frutos foram coletados manualmente e separados em sacos plásticos de acordo com o cacho o qual foram retirados. Após a coleta, os frutos foram transportados até o laboratório de mecanização agrícola do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa, onde foram lavados e realizadas as análises laboratoriais.

Todos os frutos foram individualmente pesados por meio de balança digital de precisão e tiveram seus diâmetros longitudinal e latitudinal mensurados através de um paquímetro digital.

#### 4.4.2. Análise da atividade biológica dos frutos por meio da técnica do *biospeckle laser*

A análise da atividade biológica obtida pela aplicação da técnica ótica do *biospeckle laser* foi realizada fruto a fruto em todas as 10 semanas de maturação avaliados. As iluminações foram efetuadas diretamente no epicarpo (casca) de cada fruto, sem nenhuma preparação prévia da amostra e em um intervalo de aproximadamente 4 horas após a coleta dos frutos em campo.

Para captura das imagens, foi utilizada uma unidade experimental móvel constituída por um microscópio portátil de alta resolução para a coleta das imagens, ligado diretamente a entrada USB de um computador, um laser de He-Ne de 50mW de potência, suportes móveis e um jogo de lentes e filtros redutores de intensidade. O laser foi posicionado a uma altura de 15 cm da amostra com uma inclinação de aproximadamente 60° em relação à amostra. O microscópio foi posicionado a 25 cm de altura da posição com uma inclinação de aproximadamente 20° em relação à amostra. Na Figura 4.1 é demonstrada a disposição da configuração experimental dos equipamentos na unidade experimental móvel.



**Figura 4.1.** Configuração experimental para aquisição das imagens do *biospeckle laser*.

A configuração experimental utilizada foi a *backscattering* (RABAL e BRAGA 2008), que registra o retorno da luz após incidir na amostra. Em cada sessão

de iluminação dos frutos foram coletadas 128 imagens em 8 bits relativas aos padrões de *biospeckle* em intervalos de 0,08s. As atividades mensuradas no experimento foram compreendidas na faixa de frequência entre 0 - 6,25 Hz. O software *Speckle Tools* (GODINHO et al., 2012) foi utilizado para realizar a aquisição das imagens dos padrões do *biospeckle* coletadas pelo microscópio portátil.

Para a geração dos índices referentes à atividade biológica (AB) no epicarpo dos frutos de macaúba, foram quantificadas as variações de intensidades do padrão do *biospeckle*, utilizando o algoritmo conhecido como Diferenças dos Valores Absolutos (CARDOSO e BRAGA, 2014), que se baseia no cálculo das variações de intensidades da história temporal do padrão do *speckle*, conhecido como THSP - *Time History Speckle Pattern* (OULAMARA et al., 1989), gerados a partir dos padrões do *biospeckle laser* (Equação 1).

$$AB = \sum_{ij} (M_{ij} \frac{MOC_{ij}}{\sum_{ij} MOC_{ij}} |i - j|) \quad (1)$$

Onde  $M_{ij}$  é o valor normalizado da matriz de co-ocorrência nas coordenadas  $i$  e  $j$ , e a  $MOC_{ij}$  é o valor real na matriz de de co-ocorrência na linha  $i$  e coluna  $j$ .

#### 4.4.3. Determinação do teor de óleo dos frutos

A extração do óleo foi realizada através do uso do solvente n-hexano no extrator *Soxhlet* pelo método 032/IV das Normas Analíticas do Instituto Adolfo Lutz (IAL, 2005). O mesocarpo do fruto foi cortado em pequenos pedaços facilitando a extração do óleo. Em seguida, o conteúdo do mesocarpo foi secado em uma estufa ventilada a 65°C por 72 h. Após a secagem, amostras de 5g foram colocadas em cartuchos de filtro de papel, que por sua vez, foram colocados no extrator *Soxhlet* de tal forma que ficaram submerso em 150 ml de n-hexano, por 8 horas, até a retirada do extrato incolor. O extrato foi transferido para uma estufa a 105°C por 24 horas para a evaporação do n-hexano e da água do óleo. Por fim, foi realizado o resfriamento a temperatura ambiente seguida de pesagem. A extração do óleo foi realizada individualmente para cada fruto, obtendo assim um valor de teor de óleo para cada amostra avaliada (Equação 2).

$$TO = \left( \frac{M_o}{M_a} \right) 100 \quad (2)$$

Em que TO se refere ao teor de óleo em porcentagem, Mo se refere a massa de óleo em gramas e Ma se refere a massa da amostra em gramas.

A variação dos valores de teores de óleo em cada semana de maturação foi analisada por meio do diagrama de caixas.

#### **4.4.4. Análise da relação do teor de óleo, atividade biológica e características físicas dos frutos**

Foi avaliada a resposta média e o desvio padrão das características físicas dos frutos (peso e diâmetro), do teor de óleo (%) e da atividade biológica ao longo das semanas de maturação.

As médias e os respectivos desvios padrões em cada semana de maturação foram calculados a partir dos valores dos parâmetros em cada cacho. O florescimento dos frutos foi utilizado como referência para definição do estágio de maturação dos cachos, sendo assim, os estádios de maturação foram contados em semanas após a florada do fruto (SAF).

A correlação entre as características físicas, teor de óleo e atividade biológica ao longo das semanas de maturação foi analisada por meio de uma matriz de coeficiente de Pearson, sendo avaliada a significância de cada coeficiente a um nível de 1%.

#### **4.4.5. Classificação dos frutos para determinação do ponto de colheita em função da atividade biológica**

Para o desenvolvimento do classificador foram definidas duas classes a partir do estágio de maturação dos frutos. A classe Imaturos (A) foi composta por frutos coletados na 41°SAF e na 45°SAF. Estes frutos foram escolhidos para representar a classe Imaturos por terem sido obtidos nas duas primeiras coletas, estádios estes considerados impróprios para colheita. A classe Maduros (B) foi composta por frutos coletados na 60°SAF e 61°SAF, isto é, nas duas últimas semanas de coleta, quando os frutos foram considerados próximos da maturação fisiológica e conseqüentemente aptos para colheita. Na Tabela 4.1 é apresentado o número de frutos em cada classe.

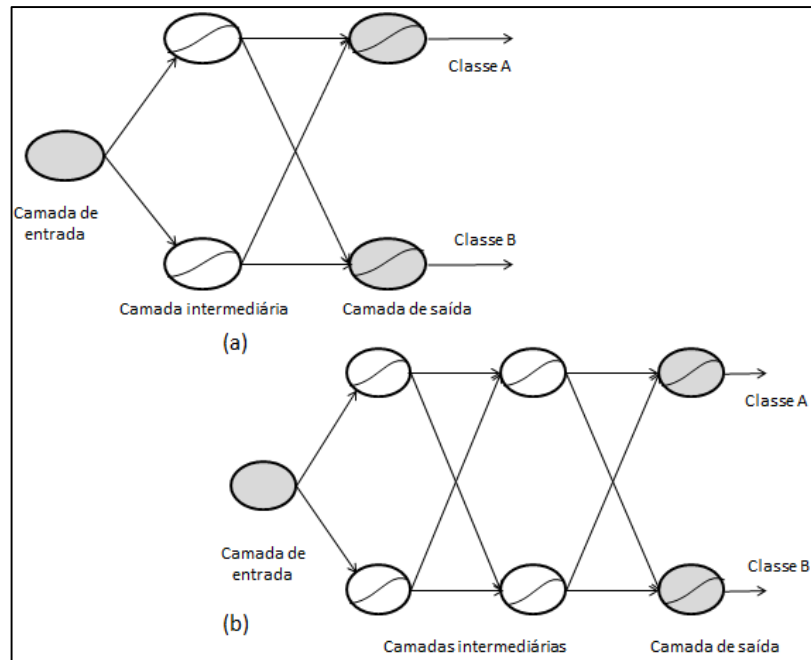
**Tabela 4.1.** Número de frutos em cada classe estabelecida

		<b>Número de frutos por SAF</b>	<b>Total de frutos em cada classe</b>
<b>Classe Imaturos (A)</b>	41°SAF	94	181
	45°SAF	87	
<b>Classe Maduros (B)</b>	60°SAF	70	139
	61°SAF	69	

Para comprovar a diferença estatística entre as classes Imaturos e Maduros, os dados referentes a atividade biológica foram submetidos ao teste t para amostras independentes a um nível de significância de 5%.

Para classificar os frutos em classe Imaturos e classe Maduros a partir da atividade biológica mensurada pelo *biospeckle laser*, foi treinada uma rede neural acíclica e retroalimentada (*feedforward*) pelo algoritmo retropropagação do erro (*backpropagation*), utilizando a variação de Levenberg-Marquadt para acelerar o tempo de treinamento e melhorar o desempenho na classificação dos padrões (DEMUTH et al., 2008).

Foram avaliadas duas arquiteturas. A arquitetura da rede neural 1 (RN1) foi composta por uma camada de entrada, uma camada intermediária com 2 neurônios, uma camada de saída com 2 neurônios (Figura 4.2a). A arquitetura da rede neural 2 (RN2) foi composta por uma entrada, duas camadas intermediárias e uma camada de saída com 2 neurônios (Figura 4.2b). A atividade biológica foi utilizada como o descritor de entrada. As camadas intermediárias e as camadas de saídas utilizaram a tangente hiperbólica como função de ativação. Foi utilizado um sistema binário na camada de saída, sendo o 0 referente a frutos classificados na classe Imaturos (A) e o 1 referente a frutos classificados na classe maduros (B), considerados aptos para colheita.



**Figura 4.2.** Representação das arquiteturas das redes neurais utilizadas.

Utilizou-se 50% do número total de frutos para o treinamento das redes, 20% para validação e 30% para o teste das redes treinadas. Tendo em vista que no início do treinamento os parâmetros das redes são gerados aleatoriamente e estes valores influenciam o treinamento, cada arquitetura foi treinada 10 vezes. O treinamento foi interrompido pela técnica de parada mais cedo, quando o aumento do erro na amostra de validação ocorria em 6 ciclos consecutivos. Foi selecionada a rede neural de cada arquitetura que apresentou a maior porcentagem de acerto na classificação das amostras de teste.

O desempenho das redes escolhidas foi determinado por meio da matriz de confusão obtida na classificação da amostra de teste (CONGALTON, 1991).

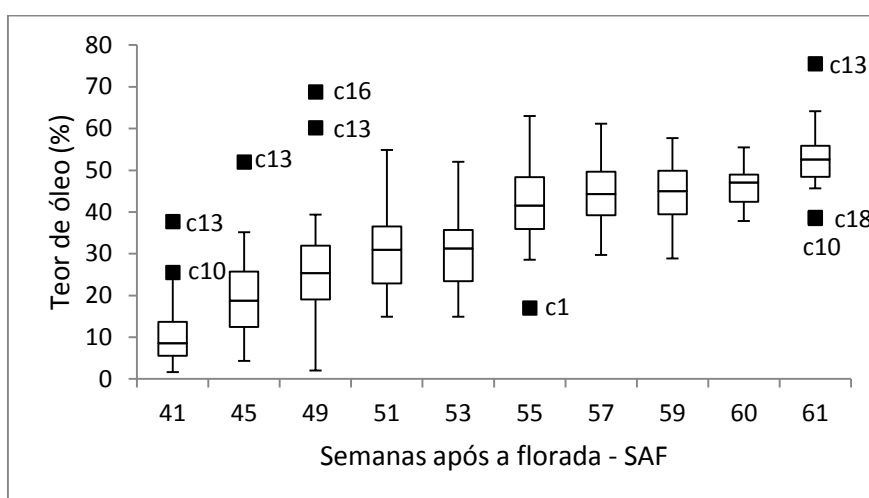
A eficiência e a comparação foram determinadas pelo coeficiente de exatidão global e pelo índice Kappa. A significância dos índices Kappa foi analisada por meio do teste Z, o que permitiu verificar se a classificação pelas redes neurais foi considerada melhor que uma classificação ao acaso (DE LEEUW et al., 2006; CHAGAS et al., 2013).

A rede neural selecionada foi aplicada nos frutos das 10 semanas de maturação avaliadas, sendo analisada a porcentagem de frutos classificados na classe Imaturos (A) e na classe Maduros (B). A classificação predominante dos frutos obtidos de um cacho, determinou a classe de cada cacho.

## 4.5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.5.1. Análise do teor de óleo ao longo das semanas de maturação

Quanto mais próximos da maturação fisiológica dos frutos, maiores foram os teores de óleo encontrados nos cachos (Figura 4.3). Em estádios avançados de maturação constatou-se uma variação do teor de óleo entre 47% a 66% entre os cachos observados. Os cachos c1, c10, c13, c16 e c18 apresentaram valores discrepantes em pelo menos um dos estádios de maturação.



**Figura 4.3.** Variação dos teores de óleo dos cachos nos estádios de maturação analisados.

Destaca-se na análise da Figura 4.3 o cacho c13 por ter apresentado valores acima da variação padrão dos outros cachos durante as semanas analisadas. Sugere-se que fatores externos ou fisiológicos possam ter influenciado a atividade metabólica desta árvore específica, resultando na elevação do teor de óleo acima do padrão observado para as outras árvores da área.

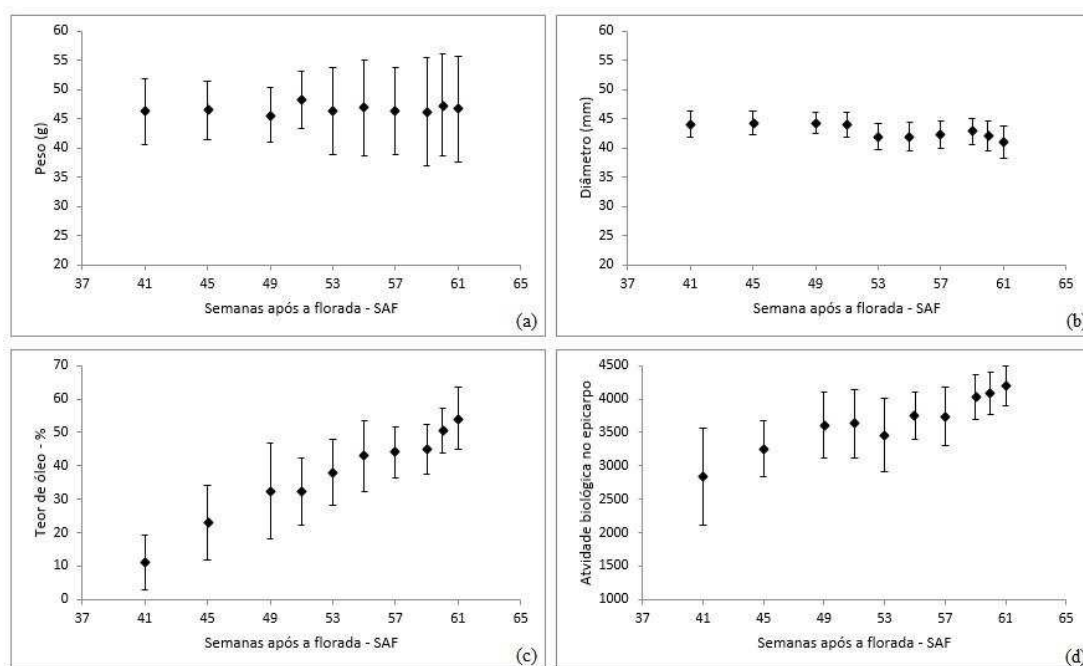
Fatores inerentes à fisiologia e ao cultivo da macaúba podem influenciar no nível de teor de óleo observados nos cachos. A não uniformidade na maturação dos frutos, principalmente em diferentes cachos é uma característica da cultura da macaúba.

Como cada cacho era proveniente de plantas diferentes, a variabilidade da fertilidade do solo pode ter refletido na variabilidade do desenvolvimento de frutos e vegetais (WUTKE et al., 2005; CALLEGARI et al., 2011; AMARANTE et al., 2014). A possível diferença da incidência solar nas plantas também pode ter contribuído para a diferença entre cachos (PILAU e ANGELONCCI, 2014), já que a produção de amido

durante a conversão energética para respiração dos frutos está diretamente ligada ao aumento do teor de óleo.

#### 4.5.2. Relação entre os parâmetros analisados

Ao analisar a média dos parâmetros físicos do fruto (peso e diâmetro, Figura 4.4a e Figura 4.4b, respectivamente), teor de óleo (Figura 4.4c) e atividade biológica (Figura 4.4d) durante as semanas de maturação após a florada observou que a média peso dos frutos se manteve estável durante todo o período analisado com as maiores variações entre os frutos nas semanas mais próximas da maturação fisiológica. A média dos diâmetro dos frutos apresentou uma discreta redução durante o mesmo período, com os desvios padrões sofrendo um discreto aumento nas semanas mais próximas da maturação fisiológica. Já as médias do teor de óleo e da atividade biológica mensurada pelo *biospeckle laser* apresentaram uma aumento gradual ao longo das semanas avaliadas.



**Figura 4.4.** Média dos parâmetros avaliados ao longo do processo de maturação: (a) peso(g); (b) diâmetro (mm); (c) teor de óleo (%); e (d) atividade biológica em cada estágio e seus respectivos desvios padrões.

Montoya (2013) demonstrou que tanto o diâmetro quanto a matéria fresca dos frutos de macaúba apresentaram um comportamento estabilizado a partir da 10<sup>a</sup> SAF,

fato também constatado na análise dos dados apresentados na Figura 4a e Figura 4b. Entre a 41ª SAF e a 61ª SAF, os frutos se encontraram na fase de maturação bioquímica onde ocorrem as principais transformações físicas, químicas e bioquímicas ligadas aos parâmetros de qualidades, porém não há aumento do tamanho dos frutos. No entanto o discreto aumento do desvio padrão nas médias do peso e do diâmetro dos frutos nas semanas mais próximas da maturação fisiológica indicam a ocorrência de aumento da desuniformidade no aspecto físico do fruto em estádios mais avançados de maturação.

A tendência de aumento do teor de óleo ao longo do processo de maturação (Figura 4.4c), também foi observado por Montoya (2013), que determinou um valor máximo de 55% de teor de óleo na 62ª SAF para frutos de macaúba. A síntese e o acúmulo de óleo nos frutos estão diretamente ligados à disponibilidade de reservas polissacarídeas (FRANÇA et al., 1999). O amido acumulado é a possível matéria-prima para a produção de óleo (MONTROYA, 2013). O amido, considerado a reserva energética dos frutos em forma de açúcares, é hidrolisado por enzimas específicas durante o processo de maturação liberando carbono e energia para o vegetal (CHITARRA e CHITARRA, 2005). A redução dos teores de amido coincide com o aumento do teor de óleo. Desta forma, a hidrólise do amido pode ser responsável por gerar os ácidos graxos, os quais podem atingir até 70% de teor de óleo em base seca no mesocarpo dos frutos de macaúba, podendo ser utilizados para a produção de biocombustíveis (CETEC, 1983; MOTA et al., 2011).

Por sua vez, a tendência de aumento da atividade biológica ao longo dos estádios de maturação pode estar associada a degradação da clorofila. A alta concentração de clorofila em tecidos vegetais faz com que a luz laser seja absorvida pelo fruto gerando padrões de *biospeckle* com baixas intensidades de variação (BERGKVIST, 1997). Com a redução dos teores de clorofila na maturação dos frutos, menos luz é absorvida, tendo como consequência, o aumento do espalhamento da luz laser refletida (*back-scattering*) geradora do fenômeno do *biospeckle* (RABAL e BRAGA, 2008; ZUDNEK e HEPPICH e, 2012).

Na Tabela 4.2 estão apresentadas as correlações entre os valores médios de atividade biológica, teor de óleo, peso, diâmetro nas semanas de maturação após a florada do fruto. Ao analisar a correlação das características físicas e os outros parâmetros, verificou-se que o peso não apresentou correlação significativa com os demais parâmetros, enquanto, o diâmetro apresentou correlação significativa com o

teor de óleo. A correlação significativa entre o teor de óleo com a atividade biológica permitiu considerar a atividade biológica como um parâmetro indicador do teor de óleo nos frutos.

**Tabela 4.2.** Matriz de correlação de Pearson entre as variáveis avaliadas teor de óleo (TO), atividade biológica (AB), peso e diâmetro nas semanas de maturação após a florada

	<b>TO</b>	<b>AB</b>	<b>Peso</b>	<b>Diâmetro</b>
<b>Teor de óleo</b>	---	0,959*	0,155 <sup>ns</sup>	-0,823*
<b>Atividade Biológica</b>	---	---	0,206 <sup>ns</sup>	-0,665 <sup>ns</sup>
<b>Peso</b>	---	---	---	-0,051 <sup>ns</sup>
<b>Diâmetro</b>	---	---	---	

\* Correlações significativas a um nível de 0,01.

Frutos com diâmetros maiores se soltaram com maior facilidade, sendo enquadrados nas coletas iniciais, o que pode ter gerado também uma correlação significativa com o teor de óleo.

A correlação significativa entre atividade biológica e teor de óleo indicou que os teores de óleos de frutos e cachos de macaúba podem ser estimados a partir de imagens geradas pelo *biospeckle laser*. Embora o aumento do teor de óleo esteja relacionado com a degradação da reserva de amido (LAVIOLA e DIAS, 2008; SATO et al., 2009) e o aumento da atividade biológica relacionado com a redução do teor de clorofila no epicarpo do fruto (CHARGOT et al., 2012), ambos estão relacionados com a evolução do processo de maturação dos frutos, o que permite gerar uma relação entre os dois parâmetros.

#### **4.5.3. Determinação do ponto de colheita em função da atividade biológica**

Foram estabelecidas duas classes de acordo com o estágio de maturação dos frutos. A classe Imaturos foi composta pelos frutos obtidos na 41°SAF e 45°SAF, sendo estes estádios escolhidos por apresentarem frutos imaturos para colheita. A classe Maduros foi composta por frutos na 60°SAF e 61°SAF, período considerado próximo da época ideal para colheita, já que o desenvolvimento dos frutos de macaúba até a maturidade fisiológica é estimado em aproximadamente 62 semanas após a

abertura das flores (MONTTOYA, 2013).

O teste de t demonstrou a diferença estatística entre as médias dos valores da atividade biológica da classe Imaturos e da classe Maduros (Tabela 4.3).

**Tabela 4.3.** Comparação das médias dos valores da atividade biológica para as duas classes estabelecidas por meio do teste de t para amostras independentes a 5% de significância

<b>ATIVIDADE BIOLÓGICA</b>	
<b>CLASSE IMATUROS (A)</b>	3065,93 <i>a</i>
<b>CLASSE MADUROS (B)</b>	4140,80 <i>b</i>

Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de t a um nível de significância de 5%.

A RN2 apresentou maior acurácia na classificação dos frutos da amostra de teste do que a RN1 (Tabelas 4.4 e 4.5). O coeficiente Kappa demonstrou que as classificações realizadas por ambas as redes foram melhores que uma classificação ao acaso a um nível de significância de 0,01 (Tabela 4.6). A RN2 apresentou uma eficiência global de 82,29 % e o coeficiente Kappa de 0,65, sendo escolhida como a rede mais indicada para realização da classificação dos frutos.

**Tabela 4.4.** Matriz de erro obtida entre o grupo de frutos utilizados para o teste e a classificação resultante após a aplicação RN1 (Classe Imaturos = 54 frutos; Classe Maduros = 42 frutos)

	<b>Classe Imaturos</b>	<b>Classe Maduros</b>	<b>Acurácia do usuário (%)</b>
<b>Classe Imaturos</b>	44	9	83,30
<b>Classe Maduros</b>	10	33	76,74
<b>Acurácia do produtor (%)</b>	81,48	78,57	

**Tabela 4.5.** Matriz de erro obtida entre o grupo de frutos utilizados para o teste e a classificação resultante após a aplicação RN2 (Classe Imaturos = 54 frutos; Classe Maduros = 42 frutos)

	Classe Imaturos	Classe Maduros	Acurácia do usuário (%)
<b>Classe Imaturos</b>	39	2	95,12
<b>Classe Maduros</b>	15	40	72,72
<b>Acurácia do produtor (%)</b>	72,22	95,23	

**Tabela 4.6.** Parâmetros para verificação da eficiência da rede utilizada no grupo de teste

Parâmetro	RN 1	RN 2
Eficiência Global (EG%)	80,21	82,29
Coefficiente Kappa (K)	0,60	0,65
Zc	7,2922*	8,8047*

\*Significativo a um nível de 0,01.

Ao analisar a classificação dos frutos nas 10 semanas de maturação, os frutos colhidos até a 57<sup>o</sup>SAF foram predominantemente classificados na classe Imaturos, apresentando teor de óleo médio de até 45,50 % e diâmetro médio de até 42,16 mm (Tabela 4.7). Ressalta-se que a porcentagem de classificação dos frutos colhidos na 55<sup>a</sup> SAF e 57<sup>a</sup> SAF próxima dos 50,00% pode ser um indicativo de que nestas datas, o número de frutos imaturos para colheita e de frutos no ponto de colheita estão próximos, tornando a classificação variável. A partir da 59<sup>o</sup>SAF os frutos foram classificados predominantemente na classe Maduros, sendo considerados aptos para a colheita, ao se utilizar atividade biológica como parâmetro de avaliação do estágio de maturação. Nestes estádios os frutos apresentaram os teores de óleo médio mais elevados (superiores a 45,96 %) e diâmetros médios entre 42,44 mm à 40,63 mm.

**Tabela 4.7.** Frutos classificados na classe Imaturos (A) e classe Maduros (B) por meio da rede neural RN2

	NF	Classe Imaturos	Classe Maduros	TO(%)	Dm(mm)	CP
41 SAF	94	82,97 %	17,02 %	9,68	44,00	A
45 SAF	87	72,41 %	27,59 %	22,56	44,25	A
49 SAF	90	58,89 %	41,11 %	31,02	43,23	A
51 SAF	95	57,95 %	42,05 %	32,63	44,06	A
53 SAF	71	71,84 %	28,16 %	39,58	41,57	A
55 SAF	67	50,74 %	49,25 %	44,68	41,47	A
57 SAF	88	56,82 %	43,18 %	45,50	42,16	A
59 SAF	78	20,51 %	79,49 %	45,96	42,44	B
60 SAF	70	20,00 %	80,00 %	50,67	41,97	B
61 SAF	69	11,59 %	88,41 %	53,02	40,63	B

Onde: NF = número de frutos; TO(%) = teor de óleo; Dm(mm) = diâmetro médio; CP = classe predominante.

A atividade biológica foi um parâmetro capaz de distinguir frutos imaturos e maduros de macaúba. Nos estádios extremos de maturação, 41ª SAF e 61ª SAF, foram constados os menores erros na classificação, 17,02 % e 11,59 %. Nestes casos, o erro da classificação pode estar associado as imprecisões experimentais durante a aplicação da técnica do *biospeckle*, a presença de injurias na região iluminada do epicarpo dos frutos como microfissuras, rachaduras e regiões escurecidas que influenciaram nos valores da atividade biológica e a variações no nível de clorofila no epicarpo dos frutos.

O período entre a 55ªSAF e 57ªSAF, apresentou a menor diferença entre a porcentagem de frutos classificados na classe Imaturos e na classe Maduros, demonstrando que em estádios próximos do ponto de colheita a classificação pela atividade biológica tem a acurácia reduzida. A maturação não uniforme, principalmente dos frutos provenientes de diferentes cachos, pode ter refletido na variação da atividade biológica neste período.

O possível efeito climatérico nos frutos de macaúba pode ser um ponto positivo para a determinação do momento da colheita, uma vez que os frutos tendem a continuar o processo de maturação, inclusive com a elevação do teor de óleo, caso se realize a coleta antes da maturação fisiológica dos frutos e estes sejam armazenados

adequadamente (GOULART, 2014). De acordo com os resultados apresentados na Tabela 4.7 a partir da 59ª SAF pode-se obter uma colheita de forma seletiva, com os frutos em estádios de maturação fisiológica e que não dependerão da fase de pós colheita para atingir a maturação fisiológica. No entanto, foi observado que a partir da 55ª SAF, pode-se obter uma quantidade aproximada de frutos já aptos para colheita, e frutos ainda inapropriados para a colheita, mas que poderá completar o processo de maturação durante o armazenamento. Desta forma, a 55ª SAF se mostra ser o período adequado para a realização de uma colheita antecipada.

Ressalta-se que embora a colheita antecipada permita a redução das perdas dos frutos maduros por desprendimento natural e no número de vezes de realização da operação de colheita em campo ao se comparar com a colheita seletiva, ela exigirá um rígido manejo na fase de pós-colheita para que o fruto atinja os maiores patamares de quantidade e qualidade de teor de óleo.

Em situações particulares onde a classificação fruto a fruto se demonstrar inviável, uma análise geral do cacho poderá ser uma opção para análise do momento da colheita. Na Tabela 4.8 é apresentada a classificação geral para cada cacho em cada estágio de maturação analisado. Os cachos foram classificados predominantemente na classe Imaturos, sendo considerados inapropriados para colheita até a 57ª SAF. A partir da 59ª SAF os cachos foram predominantemente classificados na classe Maduros, período considerado pelo classificador como aptos para o início da colheita dos frutos de macaúba, com os maiores níveis de teores de óleo, ao se utilizar a atividade biológica como parâmetro para avaliar estágio de maturação. Destaca-se novamente o cacho 13, que além de apresentar teores de óleo maiores que o padrão observado (visto na Fig. 4.3), foi considerado apto para a colheita a partir da 49ª SAF reforçando a hipótese de que o metabolismo da árvore em questão foi variado por fatores externos ou fisiológicos.

**Tabela 4.8.** Cachos classificados na classe Imaturos (A) e classe Maduros (B) por meio da rede neural RN2 em cada estágio de maturação

SAF (SEMANAS APÓS A FLORADA)										
	41	45	49	51	53	55	57	59	60	61
Cacho 1	A	A	A	B	B	A	A	A	--	--
Cacho 2	A	A	A	A	A	A	B	B	B	B
Cacho 3	A	B	B	A	--	A	A	B	B	B
Cacho 4	A	A	A	A	A	A	B	--	--	--
Cacho 5	A	A	A	A	A	--	B	B	B	B
Cacho 6	A	A	B	A	A	B	B	B	--	--
Cacho 7	B	A	B	B	B	A	A	B	B	B
Cacho 8	B	A	A	A	A	A	A	B	B	B
Cacho 9	A	A	A	B	A	--	A	A	B	B
Cacho 10	A	B	B	B	A	--	A	B	B	B
Cacho 11	A	A	A	A	A	B	B	B	--	--
Cacho 12	A	A	B	B	A	A	A	B	B	B
Cacho 13	A	A	B	B	B	--	B	B	B	B
Cacho 14	A	A	A	B	A	B	A	B	--	--
Cacho 15	A	A	A	A	--	B	B	B	B	B
Cacho 16	A	A	A	A	A	--	A	B	B	B
Cacho 17	A	B	A	B	A	B	A	B	B	B
Cacho 18	A	A	A	A	A	A	B	B	B	B
Cacho 19	A	A	A	A	A	--	A	A	B	B
Cacho 20	A	A	A	B	A	A	A	B	B	B
CP	A	A	A	A	A	A	A	B	B	B

Uma vez que a variação da maturação dos frutos dentro dos cachos ocorre de forma discreta (SOUZA, 2013), uma análise individual dos cachos por meio de uma amostragem de frutos, se mostra como uma alternativa viável para áreas onde ocorra maturação variável dos frutos entre cachos.

Ao analisar os cachos na 41ª SAF (Tabela 4.9) foi notado que em geral os frutos pertencentes a um mesmo cacho foram predominantemente classificados em uma mesma classe, o que indica da maturação uniforme dentro de um cacho. Assim, a análise da classe predominante em cada cacho pode permitir que se minimize a

influência da não uniformidade da cor dos frutos no processo de decisão de colheita destes cachos.

**Tabela 4.9.** Frutos em cada cacho classificados na classe A e classe B por meio da rede neural RN2 na 41ª SAF

<b>41ª SAF</b>						
	<b>NF</b>	<b>Classe Imaturos</b>	<b>Classe Maduros</b>	<b>TO(%)</b>	<b>CV(%)</b>	<b>CP</b>
Cacho 1	4	75,00 %	25,00 %	8,99	14,16	A
Cacho 2	4	100,00 %	00,00 %	8,19	30,90	A
Cacho 3	4	100,00 %	00,00 %	14,43	28,73	A
Cacho 4	5	80,00 %	20,00 %	17,31	16,23	A
Cacho 5	4	100,00 %	00,00%	13,42	23,82	A
Cacho 6	4	75,00 %	25,00 %	5,50	20,44	A
Cacho 7	5	20,00 %	80,00 %	1,67	68,67	B
Cacho 8	5	40,00 %	80,00 %	7,30	49,52	B
Cacho 9	5	100,00 %	00,00 %	5,06	46,57	A
Cacho 10	5	100,00 %	00,00 %	25,49	8,60	A
Cacho 11	5	100,00 %	00,00 %	5,58	25,32	A
Cacho 12	5	100,00 %	00,00 %	14,28	25,91	A
Cacho 13	5	80,00 %	20,00 %	37,67	12,43	A
Cacho 14	4	100,00 %	00,00 %	5,09	30,91	A
Cacho 15	5	80,00 %	20,00 %	7,33	16,23	A
Cacho 16	5	100,00 %	00,00 %	11,12	6,67	A
Cacho 17	5	80,00 %	20,00 %	7,40	30,81	A
Cacho 18	5	60,00 %	40,00 %	13,50	15,99	A
Cacho 19	5	100,00 %	00,00 %	9,24	37,82	A
Cacho 20	5	80,00 %	20,00 %	4,19	32,17	A
Geral	94	83,50 %	16,50 %	9,68	27,10	A

Onde: NF = número de frutos; TO(%) = teor de óleo; CV(%) = coeficiente de variação dos teores de óleo de frutos de um mesmo cacho; CP = classe predominante.

Nos cachos na 57ª SAF, foi observado que apesar da variação da classe predominante entre cachos (Tabela 4.10) demonstrando que mesmo em estádios de maturação considerados complexos para classificação devido à proximidade do ponto

de colheita, ocorre a tendência de frutos de uma mesmo cacho serem classificados em uma mesma classe. Os níveis de teores de óleo dos cachos na 57ª SAF foram superiores para todos os cachos em comparação aos níveis obtidos na 41ª SAF, apresentando uma redução considerável no coeficiente de variação dos teores de óleo dentro de cada cacho, o que pode ser um indicativo de que uma menor variação no nível de teor de óleo obtido em um cacho pode estar associada com estádios de maturação mais próximos do ponto de colheita.

Já na 61ª SAF, todos os cachos foram classificados na classe Maduros, sendo considerados aptos para colheita (Tabela 4.11). Neste estágio foram obtidos os maiores teores de óleo para todos os cachos. O baixo coeficiente de variação no teor de óleo dentro de cada cacho, observado também neste estágio, sugere a hipótese de que, independentemente da porcentagem de classificação, os teores de óleo dos frutos de um cacho tendem a estar próximos. O fato permite reafirmar que a classificação dos frutos na classe Imaturos pode estar associada a erros ligados a imprecisão experimental ou a qualidade dos atributos físicos-químicos da amostra analisada e não ao nível de óleo observado nos frutos.

**Tabela 4.10.** Frutos em cada cacho classificados na classe A e classe B por meio da rede neural RN2 na 57ª SAF

57ª SAF						
	NF	Classe Imaturos	Classe Maduros	TO(%)	CV(%)	CP
Cacho 1	3	100,00 %	00,00 %	29,70	14,23	A
Cacho 2	5	20,00 %	80,00 %	46,32	4,69	B
Cacho 3	5	60,00 %	40,00 %	31,96	34,23	A
Cacho 4	4	100,00 %	00,00 %	49,57	3,53	B
Cacho 5	4	25,00 %	75,00 %	51,95	10,02	B
Cacho 6	4	25,00 %	75,00 %	38,79	6,23	B
Cacho 7	5	100,00 %	00,00 %	45,17	34,69	A
Cacho 8	5	60,00 %	40,00 %	47,45	3,74	A
Cacho 9	5	80,00 %	20,00 %	53,23	4,78	A
Cacho 10	5	60,00 %	40,00 %	36,76	5,86	A
Cacho 11	4	00,00 %	100,00 %	39,74	12,57	B
Cacho 12	4	100,00 %	00,00 %	49,83	7,72	A
Cacho 13	5	20,00 %	80,00 %	61,16	8,61	B
Cacho 14	5	80,00 %	20,00 %	41,87	9,85	A
Cacho 15	4	00,00 %	100,00 %	43,42	6,54	B
Cacho 16	5	100,00 %	00,00 %	46,40	4,61	A
Cacho 17	3	100,00 %	00,00 %	43,20	12,84	A
Cacho 18	4	25,00 %	75,00 %	36,29	24,98	B
Cacho 19	5	100,00 %	00,00 %	50,87	1,11	A
Cacho 20	4	75,00 %	00,00 %	39,38	6,86	A
Geral	88	64,00 %	36,00 %	45,50	10,88	A

Onde: NF = número de frutos; TO(%) = teor de óleo; CV(%) = coeficiente de variação dos teores de óleo de frutos de um mesmo cacho; CP = classe predominante.

**Tabela 4.11.** Frutos em cada cacho classificados na classe A e classe B por meio da rede neural RN2 na 61ª SAF

61ª SAF						
	NF	Classe Imaturos	Classe Maduros	TO(%)	CV(%)	CP
Cacho 1	--	--	--	--	--	--
Cacho 2	5	00,00 %	100,00 %	55,10	4,27	B
Cacho 3	4	00,00 %	100,00 %	47,49	17,61	B
Cacho 4	--	--	--	--	--	--
Cacho 5	5	40,00 %	60,00 %	61,36	3,72	B
Cacho 6	--	--	--	--	--	--
Cacho 7	5	40,00 %	60,00 %	59,09	6,33	B
Cacho 8	5	00,00 %	100,00 %	55,97	11,54	B
Cacho 9	4	00,00 %	100,00 %	52,63	16,13	B
Cacho 10	5	20,00 %	80,00 %	38,43	4,20	B
Cacho 11	--	--	--	--	--	--
Cacho 12	5	40,00 %	60,00 %	55,38	7,55	B
Cacho 13	4	00,00 %	100,00 %	75,50	1,41	B
Cacho 14	--	--	--	--	--	--
Cacho 15	5	20,00 %	80,00 %	50,95	12,83	B
Cacho 16	5	00,00 %	100,00 %	49,34	11,39	B
Cacho 17	5	20,00 %	80,00 %	53,72	6,98	B
Cacho 18	5	00,00 %	100,00 %	38,71	17,81	B
Cacho 19	3	00,00 %	100,00 %	57,92	6,83	B
Cacho 20	4	00,00 %	100,00 %	50,56	6,36	B
Geral	69	9,00 %	91,00 %	53,02	6,75	B

Onde: NF = número de frutos; TO(%) = teor de óleo; CV(%) = coeficiente de variação dos teores de óleo de frutos de um mesmo cacho; CP = classe predominante.

Com base nos resultados, a determinação do ponto de colheita dos frutos de macaúba a partir da técnica *biospeckle laser* poderá ser utilizada como ferramenta para gerar tecnologias inovadoras que possam ser aplicadas em sistemas de seleção automatizados para avaliar a condição do fruto em relação ao seu teor do óleo e em

sensores para verificação da condição dos cachos no momento da colheita diretamente no campo.

#### 4.6. CONCLUSÃO

Os teores de óleo obtidos nos cachos de macaúba apresentaram um aumento ao longo da maturação dos frutos, sendo encontradas as maiores quantidades de óleo em frutos próximos da maturação fisiológica.

O peso se manteve estável durante todo o período de análise, enquanto, o diâmetro dos frutos, apresentou uma discreta redução no mesmo período. A atividade biológica mensurada pelo *biospeckle laser* apresentou um aumento ao longo das semanas avaliadas e uma correlação significativa com o teor de óleo ( $r= 0,959$ ).

A partir dos resultados da classificação os frutos a partir da 59<sup>o</sup> semana após a florada foram considerados no momento ideal de colheita, utilizando a atividade biológica como parâmetro para definição da maturação, demonstrando a aplicabilidade do *biospeckle laser* para determinar o momento de colheita dos frutos de macaúba.

#### 4.7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDULLAH, M. Z.; GUAN, L. C.; LIM, K. C.; KARIM, A. A. The applications of computer vision system and tomographic radar imaging for assessing physical properties of food. **Journal of Food Engineering**. v.61, 125–135p. 2004.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (ANP). Superintendência de Planejamento e Pesquisa. **Boletim Eletrônico**, v.53, 4p, 2012

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (ANP). Anuário estatístico brasileiro do petróleo, gás natural e biocombustíveis: 2014. Ministério de Minas e Energia. **Boletim Eletrônico**, p.252, 2014.

ALVES, J. A.; BRAGA, R. A.; VILAS BOAS, E. V. B. Identification of respiration rate and water activity change in fresh-cut carrots using biospeckle laser and frequency approach. **Postharvest Biology and Technology**, v. 86, p. 381-386, 2013.

AMARANTE, C. V. T.; DA ROSA, E. D. F. F.; ALBUQUERQUE, J. A.; KLAUBERG FILHO, O.; STEFFENS, C. A. Atributos do solo e qualidade de frutos nos sistemas convencional e orgânico de produção de maçãs no Sul do Brasil. **Revista Ciência Agronômica**, v. 46, n. 1, p. 99-109, 2014.

CALLEGARI, R. A.; MORAIS, F. A.; MIRANDA, N. O.; GÓES, G. B.; SILVA, R. M. Correlação entre qualidade e produtividade de frutos de meloeiro e o pH do solo. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 6, n. 1, 2011.

CARDOSO, R. R.; BRAGA, R. A. Enhancement of the robustness on dynamic speckle laser numerical analysis. **Optics and Lasers in Engineering**, v. 63, p. 19-24, 2014.

CETEC. Produção de combustíveis líquidos a partir de óleos vegetais: relatório final do Convênio. **CETEC**. Belo Horizonte, v.1/2, 1983.

CHAGAS, C. S.; VIEIRA, C. A. O.; FERNANDES FILHO, E. I. Comparison between artificial neural networks and maximum likelihood classification in digital soil mapping. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, n. 2, p. 339-351, 2013.

CHARGOT, M. S.; ADAMIAK, A.; ZDUNEK, A. Pre-harvest monitoring of apple fruits development with the use of biospeckle method. **Scientia Horticulturae**, v.145, p.23-28, 2012.

CHITARRA, M. I. F.; CHITARRA, A. B. Pós-colheita de frutos e hortaliças: fisiologia e manuseio. **2. Ed. Lavras: UFLA**, 785 p. 2005.

CLEMENT, C. R.; PÉREZ, E. L.; LEEUWEN, J. O potencial das palmeiras tropicais no Brasil: acertos e fracassos das últimas décadas. **Agrociência**. v.9, n.1/2, p.67-71, 2005.

CONGALTON, R. G. A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. **Remote Sensing of Environment**, v.49, n.12, p.1671-1678, 1991.

DE LEEUW, J.; JIA, H.; YANG, L.; LIU, X.; SCHMIDT, K.; SKIDMORE, A. K. Comparing accuracy assessments to infer superiority of image classification methods. **International Journal of Remote Sensing**, v. 27, n. 1, p. 223-232, 2006.

DEMUTH, H.; BEALE, M.; HAGAN, M. Neural network toolbox™ 6. **User's guide**, 2008.

ELFADL, E.; REINBRECHT, C.; CLAUPEIN, W. Development of near infrared reflectance spectroscopy (NIRS) calibration model for estimation of oil content in a worldwide Safflower germoplasm collection. **International Journal of Plant Production**, v. 4, p. 259 – 270, 2010.

FRANÇA, L. F.; REBER, G.; MEIRELES, A.; MACHADO, N.; BRUNNER, G. Supercritical extraction of carotenoids and lipids from buriti (*Mauritia flexuosa*), a fruit from the Amazon region. **Journal of Supercritical Fluid**, v.14, p.247-256, 1999.

GODINHO, R. P.; SILVA, M. M. ; NOZELA, J. R. ; BRAGA, R. A. Online biospeckle assessment without loss of definition and resolution by motion history image. **Optics and Lasers in Engineering**, v. 50, p. 366-372, 2012.

GOULART, S.M. Amadurecimento pós-colheita de frutos de macaúba e qualidade do óleo para a produção de biodiesel. **Dissertação**. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2014. 66p.

HAZIR, M. H. M.;SHARIFF, A. R. M.; AMIRUDDIN, M. D.; RAMLI, A. R.; SARIPAN, M. I. Oil palm bunch ripeness classification using fluorescence technique. **Journal of Food Engineering**, v.113, p. 534–540, 2012.

HENDERSON, A.; GALEANO, G.; BERNAL,R. Field guide to the palms of the Americas, **Princeton University**, p.166 – 167, 1995.

HIANE P.A., Ramos Filho M.M., Ramos M.I.L., Macedo M.L.R. Bocaiuva, *Acrocomiaaculeata (Jacq.) Lodd.*, Pulp and Kernel Oils; characterization and Fatty acid Composition. Braz. **Journal Food and Technology**.v.8, p.256-259, 2005.

INSTITUTO ADOLFO LUTZ (São Paulo – Brasil). Métodos físico-químicos para análise de alimentos: normas analíticas do Instituto Adolfo Lutz. 4ª Ed. Brasília (DF): **ANVISA**; p.96, 2005.

JUNKWON, P., TAKIGAWA, T., OKAMOTO, H., HASEGAWA, H., KOIKE, M., SAKAI, K., BAHALAYODHIN, B. Potential application of color and hyperspectral images for estimation of weight and ripeness of oil palm (*Elaeisguineensis Jacq. var. tenera*). **Agricultural Information Research**.v.18, p. 72–8, 2009.

KURENDA, A.; ADAMIAK, A.; ZDUNEK, A. Temperature effect on apple biospeckle activity evaluated with different indices. **Postharvest Biology and Technology**, v. 67, p. 118-123, 2012.

LAVIOLA, B. G.; DIAS, L. S. Teor e acúmulo de nutrientes em folhas e frutos de pinhão-manso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 5, p. 1969-1975, 2008.

LORENZI, G. M. A. C.; PIMENTEL, L. D.; DE PAULA, S. R.; NEGRELLE, R. R. B.; PAES, J. M. V. Prospecção da cadeia produtiva dos frutos da palmeira macaúba no estado de Minas Gerais. **Informe Agropecuário- EPAMIG**. Belo horizonte. v.32, n.265., p.41-51, 2011.

MARCONE, M. F., WANG, S., ALBABISH, W.; NIE, S., SOMNARAIN, D., HILL, A. Diverse Food-based Applications of Nuclear Magnetic Resonance (NMR) Technology. **Food Research International**.v.5, p. 729-747, 2013.

MATSIMBE, S. F. S.;MOTOIKE, S.Y.; PINTO, F.A.C.; LEITE, H.G.; MARCATTI, G.H. Prediction of oil content in the mesocarp of fruit from the macauba palm using spectrometry1. **Revista Ciência Agronômica**, v. 46, n. 1, p. 21-28, 2015.

MOTOIKE, S.J.; CARVALHO, M.; PIMENTEL, L.D.; KUKI, K.N.; PAES, J.M.V.; DIAS, H.C.T.; SATO, A.Y. A cultura da macaúba: implantação e manejo de cultivos racionais. **Editora UFV**. Viçosa, Minas Gerais, p.61, 2013.

MONTOYA, S.G. Caracterização do desenvolvimento do fruto da palmeira macaúba. **Dissertação**. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, MG, p.51, 2013.

MOTA, C.S; CORRÊA, T.R.; GROSSI, J.A.S., CASTRICINI, A, RIBEIRO, A.S. Exploração sustentável da macaúba para produção de biodiesel: colheita, pós-colheita e qualidade dos frutos. **Informe Agropecuário EPAMIG**. Belo Horizonte, v.32, n.265, p.41-51, 2011.

OULOMARA, G.; TRIBILLON, J.; DUVERNOY, J. Biological activity measurements on botanical specimen surfaces using a temporal de correlation effect of laser speckle. **Journal of Moderns Optics**, v. 36, n. 2, p. 136-179, Feb. 1989.

PANFORD, J. A.; DEMAN, J. M. Determination of oil content of seed by NIR: Influence of fatty acid composition on wavelength selection. **Journal of the American OilChemist'sSociety**, v. 67, p.473 –482, 1990.

PILAU, F. G.; ANGELOCCI, L. R. Balanço de radiação de copas de cafeeiros em renques e suas relações com radiação solar global e saldo de radiação de gramado. **Bragantia**, v. 73, n. 3, p. 335-344, 2014.

RABAL, H. J.; BRAGA, R. A. Dynamic laser speckle and applications. Boca Raton: **CRC**.p.304, 2008.

RABELO; G. F. BRAGA, R.A.; FABBRO, I.M.D.; TRIVI, M.R.; RABAL H.J.; ARIZAGA, R. Laser speckle techniques in quality evaluation of Orange fruits. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 9, n. 4, p. 570-575, 2005.

RIBEIRO, K. M.; BARRETO, B.; PASQUAL, M.; WHITE, P. J.; BRAGA, R. A.; DUPUY, L. X. Continuous, high-resolution biospeckle imaging reveals a discrete zone of activity at the root apex that responds to contact with obstacles. **Annals of Botany**. v. 113, p. 555-563, 2013.

SAEED, O. M. B.; SANKARAN, S.; SHARIFF, A. R. M.,; SHAFRI, H. Z. M.; EHSANI, R.; ALFATNI, M. S.;HAZIR, M. H. M. Classification of oil palm fresh fruit bunches based on their maturity using portable four-band sensor system. **Computers and Electronics in Agriculture**. v.82, p.5560, 2012.

SATO, M.; BUENO, O. D. C.; ESPERANCINI, M.; FRIGO, E. P. A cultura do Pinhão-manso (*Jatropha curcas L.*): Uso para fins combustíveis e descrição agrônômica. **Revista Varia Scientia**, v. 7, n. 13, p. 47-62, 2009.

SOUZA, C.T.F. Desenvolvimento, maturação e sistemas de colheita de frutos da macaúba (*Acrocomia aculeata*). **Dissertação**. Universidade Católica Dom Bosco. Campo Grande, MS. p.75, 2013.

VIANA, M.C.M.; SILVA, E. A.; QUEIROZ, D. S.; PAES J. M. V.; ALBERNAZ W, M.; FRAGA, G. Cultivo de Macaúba em Sistemas Agrossilvipastoris. **Informe Agropecuário - EPAMIG**. v.32, n.265, p.70-80, Belo Horizonte, 2011.

WUTKE, E. B.; TERRA, M. M.; PIRES, E. J. P.; COSTA, F.; SECCO, I. L.; RIBEIRO, I. J. A. Influência da cobertura vegetal do solo na qualidade dos frutos de videira 'Niágara rosada'. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 27, n. 3, p. 434-439, 2005.

ZDUNEK, A.; HERPPICH, W. B. Relation of biospeckle activity with chlorophyll content in apples. **Postharvest Biology and Technology**, v.64, n.1, p. 58-63, 2012.

ZDUNEK, A.; ADAMIAK, A.; PIECZYWEK, P. M.; KURNDA, A. The biospeckle method for the investigation of agricultural crops: A review. **Optics and Lasers in Engineering**, v. 52, p. 276-285, 2014.

## **CAPÍTULO 5**

### **ANÁLISE E CLASSIFICAÇÃO DOS FRUTOS DE MACAÚBA EM DIFERENTES ESTÁDIOS DE MATURAÇÃO POR MEIO DE IMAGENS DIGITAIS**

## 5. ANÁLISE E CLASSIFICAÇÃO DOS FRUTOS DE MACAÚBA EM DIFERENTES SEMANAS DE MATURAÇÃO POR MEIO DE IMAGENS DIGITAIS

### 5.1.RESUMO

O monitoramento da evolução da maturação e a identificação do ponto para colheita dos frutos da macaúba tem sido foco de pesquisas para a implantação da cultura em escala comercial. Em palmáceas, a utilização de sistemas de visão artificial a partir de câmeras digitais, vem sendo estudada com a finalidade de definir estádios de maturação por meio das características óticas relacionadas a cor dos frutos. O objetivo deste trabalho foi desenvolver um classificador para discriminar os frutos maduros, aptos para a colheita, com base nas propriedades colorimétricas, relacionando-as com o teor de óleo contido no mesocarpo dos frutos. Foram utilizados frutos de 20 cachos diferentes, divididos em nove semanas de maturação. Foram desenvolvidas classificadores por meio de redes neurais para classificar frutos aptos para colheita em função das propriedades colorimétricas provenientes dos modelos de cores RGB, HSI e CIELab. O índice Kappa e os valores de exatidão global foram utilizados para mensurar o desempenho e o teste Z para análise da significância e comparação dos classificadores. De acordo com os resultados, o classificador baseado na combinação dos parâmetros RGB e o classificador baseado no matiz foram considerados significativas e estatisticamente equivalentes apresentando um índice Kappa de 0,901 e 0,942, respectivamente, indicando a 59ª semana de maturação como momento ideal para colheita dos frutos com os teores de óleo mais elevados.

**Palavras-chave:** ponto de colheita; teor de óleo; propriedades colorimétricas.

## 5.2.ABSTRACT

### ANALYSIS AND CLASSIFICATION OF MACAW PALM FRUITS AT DIFFERENT MATURATION WEEKS USING COLOR INFORMATION

The monitoring of maturation and identification of the harvest point of macaw palm fruits has been the focus of research for the implementation of this crop on a commercial scale. In palms, the use of artificial vision systems from digital cameras has been researched in order to define maturation stages through optical characteristics related to fruit color. The aims of this study The objective of this study was to develop a classifier to discriminate mature, suitable fruit for harvest, based on colorimetric properties correlating to the oil content contained in the fruit mesocarp. Fruits from 20 different bunches were divided into nine different maturation weeks. Classifiers were developed through neural network to classify fruits suitable to harvest according to the colorimetric properties coming from the color models. Kappa index and the overall accuracy values were used to measure performance and the Z test was used for analysis of the significance and comparison of classifiers. According to the results, the classifier based on the combination of the RGB parameters and classifier based on the hue were considered statistically significant and equivalents having a Kappa index of 0.901 and 0.942, respectively, indicating the 59<sup>th</sup> week of maturation as the ideal time to harvest with the highest oil content.

**Keywords:** harvest point; oil content; colorimetric properties.

## 5.3.INTRODUÇÃO

A palmeira nativa das florestas tropicais e savanas conhecida como macaúba (*Acrocomia aculeata*) apresenta como uma das principais características a alta concentração de óleo em seus frutos. A palmeira macaúba é encontrada de maneira expressiva em Minas Gerais, Goiás, Mato Grosso do Sul, Mato Grosso, Piauí, Tocantins e Ceará (LORENZI et al., 2011). O fruto é considerado a parte economicamente mais relevante da planta, devido ao alto teor de óleo armazenado em suas partes.

O mesocarpo é a parte do fruto que apresenta a maior quantidade de óleo

podendo atingir até 70% de teor de óleo na base seca, seguido da amêndoa, que apresenta teor de óleo variando entre 46 % e 58 % e do epicarpo que possui em torno de 10 % (MOTA et al., 2011). O óleo é comumente utilizado na indústria farmacêutica para a fabricação de cosméticos, no setor alimentício, como óleo de cozinha e pelo setor energético para produção de biocombustíveis (MOOZ et al., 2012).

Segundo a Associação Brasileira das Indústrias de Óleos Vegetais (ABIOVE, 2015), a produção brasileira de biodiesel em 2014 foi de cerca de 3.428.000 m<sup>3</sup>, o que representou um aumento de 15% em relação a produção de 2013. Apesar do aumento na produção, o óleo proveniente da soja continua sendo a principal matéria-prima, responsável por 75% da produção total de biodiesel. O óleo proveniente de outras oleaginosas foi responsável por apenas 1% da produção total, demonstrando que a exploração de culturas, como a macaúba, se apresenta como uma alternativa promissora para o aumento da produção brasileira de biodiesel.

A macaúba apresenta uma produtividade de óleo entre 2,00 a 4,50 t.ha<sup>-1</sup>, enquanto que a mamona e a soja, oleaginosas tradicionais na exploração para biocombustíveis, apresentam uma produtividade média de 0,60 t.ha<sup>-1</sup> e 0,45 t.ha<sup>-1</sup>, respectivamente (ROSCOE et al., 2007). A produtividade de óleo da macaúba é comparada com a produtividade do dendê, que apresenta cerca de 4,0 t.ha<sup>-1</sup> (AGRIANUAL, 2012).

Apesar do grande potencial para a produção de biodiesel, o aumento de informações sobre características de cultivo, como a maturação dos frutos, é necessário para a exploração racional e sustentável da cultura (MOTOIKE et al., 2013). Devido à variação no nível de maturação dos frutos entre árvores e até entre cachos, na colheita de macaúba diretamente no cacho, obtém-se frutos maduros, semi-maduros e imaturos (verdes), resultando em menor quantidade e qualidade de óleo (CLEMENT et al., 2005).

Atualmente o momento do início da colheita é determinado pelo desprendimento natural maduros, geralmente em sistemas extrativistas. O contato dos frutos com o solo acarreta na perda quantitativa e qualitativa do óleo produzido, limitando o aproveitamento industrial do produto (SOUZA, 2013)

O conhecimento do ponto de colheita também resulta em um ganho para a etapa de beneficiamento dos frutos, uma vez que, por serem oleaginosos, a acidez do óleo aumenta à medida que vão se degradando, comprometendo assim a qualidade do óleo (HIANE et al., 2005).

Em geral, a determinação do estágio de maturação é essencial para que a colheita seja realizada no momento certo, sendo determinante para o manejo adequado na pós-colheita para que o produto se apresente com melhor qualidade possível, seja para consumo ou para outros fins (MANICA, 2000; FARIAS et al, 2011).

O monitoramento do controle de qualidade de frutos e vegetais por meio de imagens digitais ocorre pela avaliação das alterações nos padrões de imagens por meio dos modelos de cores. Em muitos casos, a coloração da casca ou da polpa é um fator determinante na qualidade do produto final. Produtos agrícolas podem apresentar características distintas quanto à uniformidade e intensidade da cor, de acordo com o cultivar, condições ambientais durante o ciclo produtivo e estágio de maturação fisiológica do fruto.

A classificação automatizada de produtos agrícolas a partir de imagens digitais tem recebido atenção especial devido ao aumento na demanda por produtos com alto grau de qualidade dentro de um curto período de tempo (NJOROGÉ et al., 2002). As características físicas como cor, forma, tamanho e injúrias são utilizadas para classificar o fruto quanto a sua qualidade ou estágio de maturação (SAITO et al., 2003; MOKJI e ABU BAKAR, 2007; RAZALI et al., 2009; ROCHA et al., 2010).

A cor da superfície é amplamente utilizada na seleção e colheita de frutos por ser um indicador direto de qualidade, uma vez que os consumidores tendem a associar a cor com o sabor, valor nutritivo e a segurança alimentar (STUDMAN, 2001; ABDULLAH et al., 2004).

A análise da cor por meio de imagens digitais é realizada por meio dos valores de reflectância da energia eletromagnética, sendo necessário o conhecimento dos modelos de representação das cores, que tem o objetivo de facilitar a especificação das cores de forma padronizada, permitindo identificá-las através de pontos gerados por um conjunto de coordenadas existentes dentro de um espaço constituído pelo máximo de cores possíveis (GONZALES e WOODS, 2008).

As características óticas obtidas a partir dos modelos de cores são relacionadas com parâmetros de qualidade de produtos agrícolas, como no estudo da relação do matiz com os atributos bioquímicos de diversos frutos (MENDONZA et al., 2006; PADILLA e TORRES et al., 2013; WISUTIAMONKU et al., 2015) e no uso da intensidade de vermelho, verde e azul na identificação de diferentes estágios de maturação (LÓPEZ CAMELO e GOMEZ, 2004; SHAH RIZAM et al., 2009; JI et al., 2013; BENHURA et al., 2014)

Em palmáceas, o uso de imagens digitais é observado na avaliação de estágio de maturação, definição de ponto de colheita e estimativa de teor de óleo em cachos e frutos (SAEED et al., 2012; RAJKUMAR et al., 2012; MAKKY e SONI, 2013; MOHAMMADI et al., 2015). Pesquisas vêm sendo realizadas visando o desenvolvimento de sistemas de automação para a classificação de frutos de palmáceas associados ao teor de óleo (WANSMAIL et al., 2000; CHOONG et al., 2006; MAY e AMARAN, 2011; MAKKY et al., 2014).

Uma vez que as propriedades óticas obtidas na superfície dos frutos de palmáceas são utilizadas como indicador de maturação, e os teores de óleo contidos no mesocarpo dos frutos estão diretamente associados ao ponto de maturação fisiológica, as diferentes respostas espectrais podem ser utilizadas para a estimativa da quantidade de óleo (ISMAIL et al., 2000; MATSIMBE et al., 2015).

Os frutos de macaúba apresentam como característica mudanças sutis em sua coloração durante o desenvolvimento dos frutos, passando de verde em estádios iniciais à verde-amarela, amarela ou castanha quando maduros (MOTA et al., 2011). Devido a este fato, se torna dificultada a associação do estágio de maturação com um padrão de coloração específica apenas pela análise visual. Desta forma, o uso de representação numérica da cor pode permitir a percepção de mudanças sutis no aspecto colorimétrico dos frutos, possibilitando o monitoramento do processo de maturação por meio de sensores óticos (ALFATNI et al., 2008; WU e SUN, 2013; AVILA et al., 2015).

Assim, o objetivo deste trabalho foi desenvolver um classificador para discriminar os frutos maduros, aptos para a colheita, com base nas propriedades colorimétricas, relacionando-as com o teor de óleo contido no mesocarpo dos frutos.

## **5.4.MATERIAIS E MÉTODO**

### **5.4.1. Local e aquisição das amostras**

Os frutos utilizados no experimento foram coletados no período entre os meses de Setembro de 2013 a Janeiro de 2014 em uma área localizada no município de Acaiaca, situado na Zona da Mata Mineira a 20° 23' 33'' de latitude Sul e 47° 07' 31'' de longitude Oeste, com altitude média de 601 m.

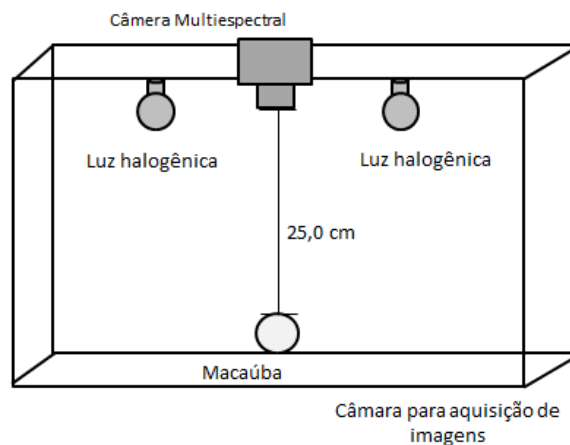
As árvores de macaúba avaliadas foram da espécie *Acrocomia aculeata*, com mais de 10 anos, em estágio reprodutivo, sendo cultivadas em sistema extrativista, sem fins comerciais e sem nenhum tratamento prévio do solo.

Para a execução do experimento, foram utilizados 20 cachos de árvores distintas, sendo coletados cinco frutos por cacho em nove estádios de maturação. Os estádios de maturação foram associados à época do início da florescência dos cachos, sendo contados entre a 41<sup>o</sup> a 61<sup>o</sup> semana após a florada (SAF).

Os frutos foram coletados manualmente e separados em sacos plásticos de acordo com o cacho do qual foram retirados. Após a coleta, os frutos foram transportados até o laboratório de mecanização agrícola do Departamento de Engenharia Agrícola (DEA) da Universidade Federal de Viçosa (UFV), onde foram lavados e conduzidos para a etapa de aquisição das imagens.

#### 5.4.2. Aquisição e processamento das imagens

Para a aquisição das imagens, foi utilizado um computador para armazenamento e processamento das imagens, 2 lâmpadas halógenas de 100W cada e uma câmera CCD multiespectral, marca Fluxdata, modelo FD-1665. A câmera digital foi posicionada a 25 cm de altura em relação ao fruto. As imagens foram coletadas no espaço de cor RGB. A Figura 5.1 apresenta um croqui da disposição do aparato experimental para aquisição das imagens.



**Figura 5.1.** Disposição experimental para aquisição das imagens por meio da câmera multiespectral.

Na etapa de pré-processamento, realizada no software livre *ImageJ*, buscou-se realçar o objeto de interesse (fruto), eliminando o fundo e possíveis ruídos da imagem.

Para tal, foi realizada uma limiarização de cada imagem por meio de um valor de limiar escolhido automaticamente pelo método de Otsu (OTSU, 1975), o qual divide o histograma em duas classes, gerando uma imagem binarizada. A segmentação do fruto foi efetuada realizando a soma entre a imagem original e a imagem binarizada (Figura 5.2).



**Figura 5.2.** Pré-processamento: aplicação da limiarização e segmentação na imagem original.

A partir dos valores médios de RGB de cada imagem, foram calculados o matiz (H) com valores variando entre 0° e 360°, a saturação (S) com valores variando entre 0 e 1, e a intensidade (I) com valores variando entre 0 e 1. O cálculo do matiz (H), saturação (S) e intensidade (I) é dado pelas Equações (1) e (2), (3) e (4), respectivamente (PEDRINI e SCHWARTZ, 2007):

$$H = \left\{ \cos^{-1} \left[ \left( \frac{(R-G)+(R-B)}{2 \cdot \sqrt{(R-G)^2 + (R-B)(G-B)}} \right) \right] \right\}, \text{ se } B < G \quad (1)$$

$$H = \left\{ 360 - \cos^{-1} \left[ \frac{(R-G)+(R-B)}{2 \cdot \sqrt{(R-G)^2 + (R-B)(G-B)}} \right] \right\}, \text{ se } B > G \quad (2)$$

$$S = 1 - \left( \frac{3 \cdot \min(R,G,B)}{R+G+B} \right) \quad (3)$$

$$I = \frac{R+G+B}{3} \quad (4)$$

Para a análise no modelo de cor CIELab, as imagens RGB dos frutos foram convertidas de acordo com as normas e equações proposta pela *Comission Internacional d'Eclairage* (PEDRINI e SCHWARTZ, 2007). Para conversão, inicialmente as imagens RGB foram transformadas para o sistema de cores primarias XYZ de acordo com as Equações (5) a (7). A partir do modelo CIELab foram avaliados a luminância, Lu (0 a 100), e as duas gamas de cor a e b associadas a cromaticidade

que vão do verde ao vermelho e do azul ao amarelo (-120 a +120), utilizando as Equações (8) a (13).

$$X = 0,490R + 0,310G + 0,200B \quad (5)$$

$$Y = 0,177R + 0,813G + 0,010B \quad (6)$$

$$Z = 0,010G + 0,990B \quad (7)$$

$$Lu = 166 \left( \frac{Y}{Y_0} \right)^{\frac{1}{2}} - 16, \text{ if } \frac{Y}{Y_0} > 0,008856 \quad (8)$$

$$Lu = 903,3 \left( \frac{Y}{Y_0} \right), \text{ if } \frac{Y}{Y_0} \leq 0,008856 \quad (9)$$

$$a = 500 \left[ \left( \frac{X}{X_0} \right)^{\frac{1}{2}} - \left( \frac{Y}{Y_0} \right)^{\frac{1}{2}} \right], \text{ if } \frac{X}{X_0} \text{ and } \frac{Y}{Y_0} > 0,008856 \quad (10)$$

$$a = \left[ f \left( \frac{X}{X_0} \right) - f \left( \frac{Y}{Y_0} \right) \right], \text{ if } \frac{X}{X_0} \text{ and } \frac{Y}{Y_0} \leq 0,008856 \quad (11)$$

$$b = 200 \left[ \left( \frac{X}{X_0} \right)^{\frac{1}{2}} - \left( \frac{Z}{Z_0} \right)^{\frac{1}{2}} \right], \text{ if } \frac{Y}{Y_0} \text{ and } \frac{Z}{Z_0} > 0,008856 \quad (12)$$

$$b = \left[ f \left( \frac{Y}{Y_0} \right) - f \left( \frac{Z}{Z_0} \right) \right], \text{ if } \frac{Y}{Y_0} \text{ and } \frac{Z}{Z_0} \leq 0,008856 \quad (13)$$

Em que  $f(t) = t^{1/2}$  quando  $t > 0,008856$ . Caso ao contrário  $f(t) = 7,787t + \frac{16}{116}$ . X, Y e Z são componentes das cores primárias no sistema CIE.  $X_n$ ,  $Y_n$  e  $Z_n$  são valores tabelados referentes ao agente iluminante A.

A partir dos valores de a e b, foram calculados os valores de cromaticidade (C) de acordo com as Equação (14).

$$C = \sqrt{a^2 + b^2} \quad (14)$$

### 5.4.3. Determinação do teor de óleo dos frutos

A extração do óleo ocorreu por meio do uso do solvente n-hexano em extrator *Soxhlet* pelo método 032/IV das Normas Analíticas do Instituto Adolfo Lutz (IAL, 2005). O mesocarpo do fruto foi cortado e secado em uma estufa ventilada a 65°C por 72 h. Após a secagem, as amostras foram pesadas e colocadas em cartuchos de filtro de papel, que por sua vez, foram colocados no extrator *Soxhlet*, onde ficaram submersos em 150 ml de n-hexano, durante 8 horas, até a retirada do extrato incolor.

O extrato foi transferido para uma estufa a 105°C durante 24 horas, onde ocorreu a evaporação do n-hexano e da água contida no mesocarpo. Após 24 horas, as amostras foram resfriadas a temperatura ambiente e pesadas na sequência. O processo de extração foi realizado fruto a fruto, obtendo um valor de teor de óleo para cada amostra avaliada (Equação 15).

$$TO = \left( \frac{Mo}{Ma} \right) 100 \quad (15)$$

Onde, o teor de óleo, TO, dado em porcentagem, é a relação entre massa do óleo, Mo, em gramas e a massa da amostra, Ma, em gramas.

Foi analisada a relação entre a média do teor de óleo em cada época de maturação por meio de um modelo de regressão linear simples testado à um nível de significância de 5%.

### 5.4.4. Classificação dos frutos para determinação do ponto de colheita em função dos modelos de cores

Os frutos utilizados no experimento foram divididos em duas classes. A classe Imaturos (A) foi composta por frutos coletados na 41°SAF e na 45°SAF. Estes frutos foram escolhidos por estarem nos dois estádios iniciais das coletas, sendo considerados verdes para colheita. A classe Maduros (B) foi composta por frutos coletados na 60°SAF e na 61°SAF, os quais foram considerados próximos da maturação fisiológica e conseqüentemente próximos do ponto para colheita. Na Tabela 5.1 é apresentado o número de frutos em cada classe.

**Tabela 5.1.** Número de frutos em cada classe estabelecida

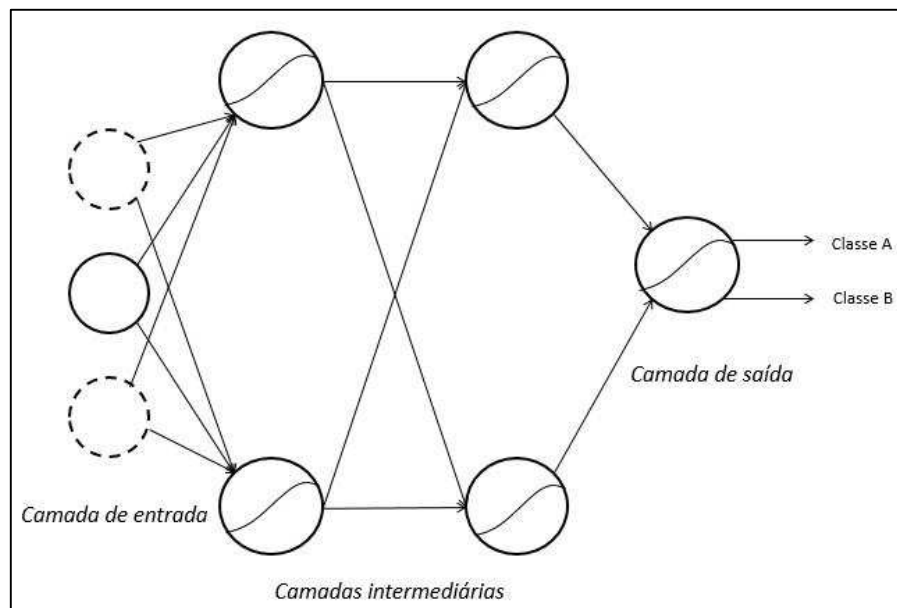
		<b>Número de frutos por SAF</b>	<b>Total de frutos em cada classe</b>
<b>Classe Imaturos (A)</b>	41°SAF	98	198
	45°SAF	100	
<b>Classe Maduros (B)</b>	60°SAF	74	149
	61°SAF	75	

Para classificar os frutos em classe Imaturos e a classe Maduros foram treinadas duas redes neurais acíclicas e retroalimentadas (*feedforward*) pelo algoritmo retropropagação do erro (*backpropagation*), utilizando a variação de Levenberg-Marquadt para acelerar o tempo de treinamento e melhorar o desempenho na classificação dos padrões (DEMUTH et al., 2008).

Foram desenvolvidas 11 redes neurais de acordo com os parâmetros provenientes dos modelos de cores (Tabela 5.2). A arquitetura das redes foi composta por até 3 vetores de entrada, dependendo do número de descritores para cada rede. Foram utilizadas outras duas camadas intermediárias com 2 neurônios cada e uma camada de saída (Figura 5.3). As camadas intermediárias e a camada de saída utilizaram a tangente hiperbólica como função de ativação para ambas as redes. Os valores obtidos na camada de saída se encontram distribuídos continuamente entre 0 e 1, sendo aproximados para o número inteiro mais próximo. Desta forma, a saída da rede 0 se referiu a frutos classificados na classe Imaturos (A) e a saída da rede 1 se referiu a frutos classificados na classe Maduros (B).

**Tabela 5.2.** Descritores de entrada para cada rede neural desenvolvida

REDE NEURAL	NÚMERO DE DESCRITORES DE ENTRADA
RN-R	1 (intensidade de vermelho)
RN-G	1 (intensidade de verde)
RN-B	1 (intensidade de azul)
RN-RGB	3 (intensidades de vermelho, verde e azul)
RN-H	1 (matiz)
RN-S	1 (saturação)
RN-I	1 (intensidade)
RN-HSI	3 (matiz, intensidade e saturação)
RN-L	1 (luminância)
RN-C	1 (comaticidade)
RN-Lab	2 (luminância e cromaticidade)



**Figura 5.3.** Arquitetura das redes neurais desenvolvidas com a variação de até 3 descritores na camada de entrada

Utilizou-se 50% do número total de frutos para o treinamento das redes, 20% para validação e 30% para o teste das redes treinadas. Cada rede foi treinada 10 vezes, uma vez que no início dos treinamentos os parâmetros das redes são gerados

aleatoriamente. O treinamento foi interrompido pela técnica da parada mais cedo, quando ocorria o aumento do erro na amostra de validação em 6 ciclos consecutivos. Foi selecionada a rede neural que apresentou a maior porcentagem de acerto na classificação das amostras de teste para representar cada tipo de rede.

A acurácia da classificação foi avaliada pelo coeficiente de exatidão global e pelo índice Kappa calculado por meio da matriz de erros obtida na classificação da amostra de teste.

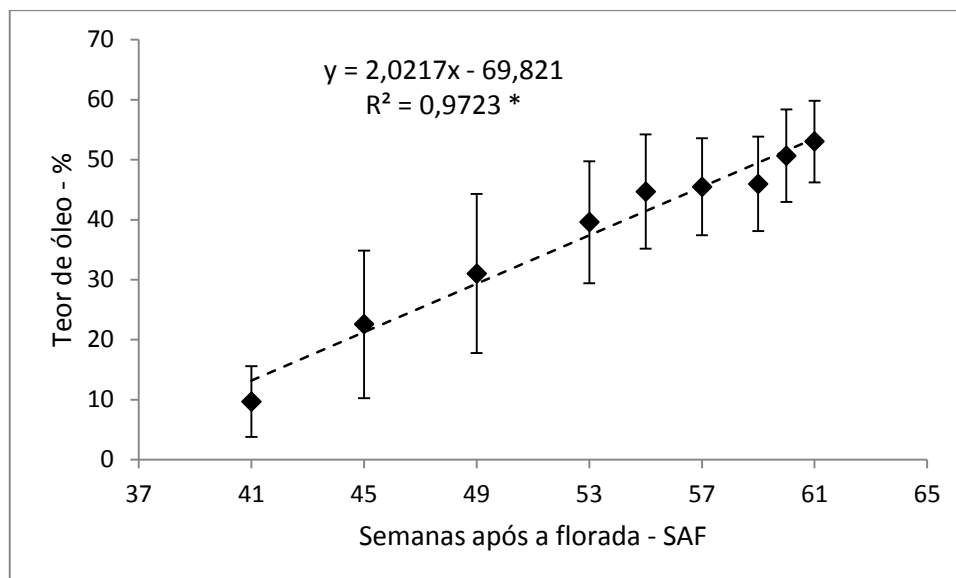
Selecionou-se as redes que apresentaram o índice Kappa maior que 0,75 (LANDIS e KOCH, 1977) e que tiveram sua classificação considerada melhor que uma classificação ao acaso por meio do teste Z. Para verificar a ocorrência de diferença entre a acurácia das classificações, os coeficientes kappa das redes neurais selecionadas foram comparados utilizando o teste Z a um nível de significância de 0,01 ( $Z_{\text{tab}} = 2,57$ ) (CONGALTON e MEAD, 1986).

As redes neurais escolhidas foram utilizadas para classificar os frutos dos 9 estádios de maturação avaliados, sendo analisada a porcentagem de frutos classificados na classe Imatura e na classe Madura. O cacho foi alocado na classe que apresentou maior porcentagem de seus frutos, sendo esta denominada classe predominante.

## **5.5.RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **5.5.1. Relação entre o teor de óleo e as propriedades colorimétricas**

Ao analisar a relação entre teor de óleo e semanas de maturação na Figura 5.4, nota-se que os cachos mais próximos do ponto de maturação fisiológica apresentaram os maiores teor de óleo em seus frutos. Em média os valores de teor de óleo ao longo das semanas de maturação apresentaram uma tendência de aumento nos teores de óleo até a 55°SAF, onde foi obtido um teor de óleo médio de 37%. Entre a 57° e a 59° SAF foi observado um período de estabilização do teor de óleo em média em 45%. Entre a 60° e a 61°SAF, período considerado próximos do ponto de maturação fisiológica dos frutos, foram obtidos os teores de óleo mais elevados (em média 53%), demonstrando que este é o período indicado para realizar a colheita dos frutos.



**Figura 5.4.** Relação linear entre teor de óleo médio dos frutos de macaúba e as semanas após a florada. Significância a um nível de 5%(\*)

Em termos biológicos, o aumento do teor de óleo nos frutos de macaúba está associado a síntese das reservas polissacarídeas ocorridas durante a maturação (MONTROYA, 2013). A colheita dos frutos no momento adequado, antes dos frutos se desprenderem dos cachos de forma natural, é essencial para extração das maiores quantidades de óleo (HIANE et al., 2005).

Choong et. al (2006) demonstraram uma relação positiva entre a cor utilizando o modelo RGB e os níveis de teores de óleo contido no mesocarpo dos frutos da palmácea *Elaeis guineenses* em diferentes estádios de maturação. Já Ishak e Hudzari (2010) apontaram o matiz como a propriedade colorimétrica adequada para se relacionar com o teor de óleo dos frutos da mesma palmácea. Outros estudos também demonstram que a cor dos frutos no estágio maduro pode estar associada a altos níveis de teor de óleo (ALFATNI et al., 2008; JAFFAR et. al, 2009; SUNILKUMAR e BABU, 2013).

Desta forma, sistemas automatizados utilizando a análise das propriedades colorimétricas dos frutos de macaúba podem não só indicar o momento adequado para colheita, mas como também ser utilizado como parâmetro para estimar o teor de óleo contido no mesocarpo destes frutos sem a necessidade de destruição da amostra.

A Tabela 5.3 demonstra a ocorrência da diferença entre as médias do teor de óleo dos frutos pertencentes as classes Imaturos e a classe Maduros utilizadas para o desenvolvimento do classificador. A classe A foi composta pelos frutos obtidos na

41°SAF e 45°SAF, sendo estas escolhidas por representar períodos em que os frutos foram considerados imaturos para colheita. A classe B foi composta por frutos na 60°SAF e 61°SAF, considerados aptos para colheita.

**Tabela 5.3.** Comparação das médias do teor de óleo para as classes Imaturos e Maduros por meio do teste de t para amostras independentes a 1% de significância

	<b>TEOR DE ÓLEO (%)</b>
<b>CLASSE IMATUROS (A)</b>	16,51 a
<b>CLASSE MADUROS (B)</b>	51,89 b

Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste t a 1% de significância

### **5.5.2. Classificação dos frutos a partir da determinação do ponto de colheita em função das propriedades colorimétricas**

Para classificação dos frutos aptos para colheita foram desenvolvidas onze redes neurais baseada nos modelos de cores conforme já demonstrado na Tabela 5.2. O índice Kappa calculado a partir da matriz de erro gerado por meio da aplicação das redes neurais no grupo de frutos destinado ao teste demonstrou que as classificações geradas pela RN-RGB, RN-H e RN-HSI foram significativas, consideradas melhores que o acaso a um nível de significância de 1% pelo teste z e apresentaram índice Kappa maior que 0,75, indicando excelente concordância (LANDIS e KOCH, 1977). As classificações das redes RN-R, RN-L e RN-Lab embora consideradas estatisticamente melhores que o acaso, obtiveram o índice Kappa menor de 0,75, não apresentando os requisitos necessários para a seleção. As RN-H e RN-HSI apresentaram os maiores valores de exatidão global e índice Kappa demonstrando que estas redes foram a de melhor acurácia para classificação dos frutos (Tabela 5.4).

**Tabela 5.4.** Parâmetros para verificação da eficiência da rede utilizada no grupo de teste

<b>Rede Neural</b>	<b>Eficiência Global (%)</b>	<b>Índice Kappa</b>	<b>Zc</b>
RN-R	85,71 %	0,703 *	9,993
RN-G	59,05 %	0,085	1,130
RN-B	50,82 %	0,001	0,333
RN-RGB	95,24 %	0,901 *	21,118
RN-H	97,14 %	0,942 *	28,291
RN-S	58,10 %	0,025	1,011
RN-I	60,25 %	0,205	2,130
RN-HSI	97,14 %	0,942 *	28,291
RN-L	67,62 %	0,300 *	3,408
RN-C	62,86 %	0,160	2,353
RN-Lab	64,76 %	0,298*	3,253

\*Significativo a um nível de 0,01.

Uma vez que a RN-H e a RN- HSI obtiveram os mesmos parâmetros de acurácia ficou evidenciado que as propriedades colorimétricas saturação (S) e intensidade (I) não influenciaram na classificação dos frutos, o que demonstra que uma análise apenas pelo matiz (H) é suficiente para a classificar os frutos de macaúba pelo modelo de cor HSI. Já ao analisar a classificação pelo modelo de cor RGB percebe-se que a combinação dos valores de vermelho (R), verde (G) e azul (B) é determinante para o sucesso do classificador. As análises dessas propriedades de forma individual, não permitiu a obtenção de classificadores com acurácia relevante, sendo a intensidade de vermelho o único parâmetro a obter uma classificação estatisticamente melhor que o acaso a um nível de significância de 1%, porém com o índice Kappa entre 0,40 e 0,75, indicando um concordância mediana (LANDIS e KOCH, 1977).

A comparação entre RN-RGB, RN- H e RN-H, pelo teste Z indicou que os classificadores foram considerados estatisticamente iguais a um nível de significância de 1% (Tabela 5.5).

**Tabela 5.4.** Comparação entre os classificadores NN-RGB e NN-H pelo teste Z

Comparação	$Z_{cal}$	$Z_t (1\%)$
RN-RGB x RN-H	0,76*	2,57

\*  $Z_{cal} < Z_t (1\%)$  indica que os classificadores são iguais estatisticamente a um nível de 0.01 de significância

A classificação dos frutos nas 9 semanas de maturação analisadas por meio da RN-RGB, apontou que os frutos colhidos até a 53°SAF foram predominantemente classificados na classe A, sendo considerados imaturos para colheita e apresentando teor de óleo médio de até 31,02 % (Tabela 5.6). Entre a 53°SAF e a 57°SAF observou-se uma alta variação na classificação dos frutos, a qual pode estar associada ao fato de que em estádios mais próximos da colheita, a classificação pela RN-RGB se torna variável, uma vez que os frutos nestes períodos apresentaram características colorimétricas semelhantes dificultando a distinção. A partir da 59°SAF os frutos foram classificados predominantemente na classe B, sendo considerados aptos para a colheita, Nestes estádios os frutos apresentaram os teores de óleo médios superiores a 45,96%.

**Tabela 5.6.** Frutos classificados na classe Imaturos (A) e classe Maduros (B) por meio da rede neural RN-RGB

	NF	Classe A	Classe B	TO(%)	CP
41 SAF	98	86,73 %	13,27 %	9,68	A
45 SAF	100	100,00 %	00,00 %	22,56	A
49 SAF	100	100,00 %	00,00 %	31,02	A
53 SAF	82	56,10 %	43,90 %	39,58	A
55 SAF	76	01,32 %	98,68 %	44,68	B
57 SAF	93	59,14 %	40,86 %	45,50	A
59 SAF	87	01,15 %	98,85 %	45,96	B
60 SAF	74	00,00 %	100,00 %	50,67	B
61 SAF	75	00,00 %	100,00 %	53,02	B

(RN-RGB= Rede neural utilizando o RGB como descritores de entrada; NF = Número de frutos; TO = Teor de óleo; CP= Classe predominante; SAF = semanas após a florada).

A distinção das duas classes, antes e após 59°SAF, demonstrou que, apesar da não uniformidade das cores dos frutos durante a maturação, o aspecto colorimétrico próximo ao momento da colheita apresentaram diferenças nos padrões espectrais em relação aos frutos considerados imaturos. Estas variações, as quais muitas vezes são de difícil percepção visual, podem ser perceptíveis ao utilizar os modelos de cores, o que leva a acreditar no potencial de classificadores baseados nas propriedades colorimétricas para determinação do ponto de colheita dos frutos de macaúba.

A redução acentuada no número de frutos contidos nos cachos em estádios avançados é um indicativo em campo da maturação fisiológica dos frutos contidos nos cachos, uma vez que ao atingir o ponto de colheita os frutos tendem a se desprender do cacho com facilidade, ficando suscetíveis a intempéries naturais. Neste estágio o fruto apresenta elevados teores de óleo (HIANE et al., 2005; MATSIMBE et al., 2015), sendo o provável momento para colheita dos cachos. Neste experimento, este fato foi observado em campo de forma a partir da 60° SAF.

Em termos fisiológicos, a alteração na coloração dos frutos durante o amadurecimento pode ser atribuído a degradação da clorofila e do desenvolvimento acentuado de pigmentos carotenoides, que resultam na cor amarela, laranja e vermelho (CHITARRA e CHITARRA, 2005; WISUTIAMONKUL et al., 2015). Estes pigmentos são sensíveis a luz, oxigênio e calor (MA et al., 2015; BRAZAITYTÉ et al., 2015). Desta forma, uma variação na intensidade de radiação solar incidida em cada cacho pode ser um fator influente na produção de carotenoides e que contribui para não uniformidade da cor dos frutos.

Ao analisar a classificação dos frutos por meio da RN-H foi observado que, assim, como os resultados obtidos pela RN-RGB, os frutos foram classificados predominantemente na classe A até a 57°SAF, com exceção dos frutos analisados na 55°SAF (Tabela 5.7). Uma vez que este comportamento não era esperado, deve-se considerar como hipótese para variação da classificação da classificação entre a 55° e a 57°SAF, a influência de fatores climáticos e experimentais nos frutos colhidos nestes períodos.

A partir da 59°SAF os frutos foram classificados na classe Maduros, sendo considerados aptos para a colheita. No entanto, diferentemente do observado na classificação anterior, a RN-H apresentou alta acurácia na classificação em todas as semanas analisadas.

**Tabela 5.7.** Frutos classificados na classe Imaturos (A) e classe Maduros (B) por meio da rede neural RN-H

	NF	Classe A	Classe B	TO (%)	CP
41 SAF	98	98,98 %	01,02 %	9,68	A
45 SAF	100	100,00 %	00,00 %	22,56	A
49 SAF	100	100,00 %	00,00 %	31,02	A
53 SAF	82	100,00 %	00,00 %	39,58	A
55 SAF	76	03,95 %	96,05 %	44,68	B
57 SAF	93	100,00 %	00,00 %	45,50	A
59 SAF	87	05,75 %	94,25 %	45,96	B
60 SAF	74	02,70 %	97,30 %	50,67	B
61 SAF	75	04,05 %	95,95 %	53,02	B

(RN-H= Rede neural utilizando o matiz (H) como descritor de entrada; NF = Número de frutos; TO = Teor de óleo; CP= Classe predominante; SAF = semanas após a florada).

O matiz é considerado uma propriedade altamente eficaz para classificação dos frutos em diferentes estádios de maturação, por ser uma propriedade colorimétrica associada ao comprimento de onda dominante em um espectro que permitiu ao observador perceber a cor dominante da imagem (GONZALEZ E WOODS, 2008). Sistemas automatizados de classificação de frutos por meio de visão artificial utilizaram o matiz para determinar estádio de maturação em palmáceas (SIRISATHITKUL et al., 2006; SUSILAWATI et al., 2011; MAKKY et al., 2014). FADILAH et al. (2012) utilizaram o matiz como descritor de entrada de um sistema de classificação desenvolvido por rede neural para classificar frutos da palmácea *Elaeis guineensis* quanto ao estádio de maturação e obteve uma porcentagem de acerto de 91,63% o que ratifica a eficiência deste parâmetro.

Em situações particulares, onde as mensurações colorimétricas fruto a fruto não é possível, uma análise individual dos cachos por meio de uma amostragem de frutos pode ser uma alternativa para a determinação do ponto de colheita. Na Tabela 5.8 é apresentado o resultado geral para classificação dos cachos em cada estádio de maturação. Ao analisar cada estádio de maturação, foi observado que os cachos foram classificados na mesma classe, demonstrando a eficiência das propriedades colorimétricas em indicar o momento da colheita da macaúba a partir da 59ª SAF.

**Tabela 5.8.** Cachos classificados na classe A e classe B por meio da rede neural RN-

H em cada época de maturação e seus respectivos teores de óleo

<b>SAF (SEMANAS APÓS A FLORADA)</b>									
Cacho	41	45	49	53	55	57	59	60	61
Ch 1	A (9%)	A (27%)	A (8%)	A (25%)	B (17%)	-- (29%)	B (32%)	-- (51%)	-- (--)
Ch 2	A (8%)	A (25%)	A (45%)	A (42%)	B (49%)	A (46%)	B (43%)	B (52%)	B (55%)
Ch 3	A (14%)	A (23%)	A (25%)	-- (29%)	B (40%)	A (32%)	B (30%)	B (52%)	B (47%)
Ch 4	A (17%)	A (39%)	A (38%)	A (42%)	B (49%)	A (50%)	B (46%)	-- (--)	-- (--)
Ch 5	A (13%)	A (18%)	A (38%)	A (44%)	-- (47%)	A (52%)	B (52%)	B (55%)	B (61%)
Ch 6	A (6%)	A (10%)	A (25%)	A (32%)	B (36%)	A (39%)	B (--)	-- (--)	-- (66%)
Ch 7	A (2%)	A (18%)	A (38%)	A (45%)	A (--)	A (45%)	B (--)	B (51%)	B (59%)
Ch 8	A (7%)	A (33%)	A (30%)	A (37%)	-- (49%)	A (47%)	B (52%)	B (48%)	B (56%)
Ch 9	A (5%)	A (22%)	A (33%)	A (37%)	B (51%)	A (53%)	B (52%)	B (54%)	B (53%)
Ch 10	A (25%)	A (9%)	A (15%)	A (32%)	B (29%)	A (37%)	B (38%)	B (44%)	B (38%)
Ch 11	A (6%)	A (8%)	A (26%)	A (23%)	B (35%)	A (40%)	B (39%)	-- (--)	-- (--)
Ch 12	A (14%)	A (29%)	A (35%)	A (48%)	B (52%)	A (50%)	B (48%)	B (51%)	B (55%)
Ch 13	A (38%)	A (52%)	A (60%)	A (60%)	B (63%)	A (61%)	B (59%)	B (68%)	B (76%)
Ch 14	A (5%)	A (23%)	A (29%)	A (23%)	B (41%)	B (42%)	B (46%)	-- (--)	-- (--)
Ch 15	A (7%)	A (19%)	A (30%)	-- (41%)	B (42%)	A (43%)	B (45%)	B (42%)	B (51%)
Ch 16	A (11%)	A (33%)	A (69%)	-- (43%)	B (47%)	A (46%)	B (47%)	B (47%)	B (49%)
Ch 17	A (7%)	A (17%)	A (34%)	A (36%)	B (36%)	A (43%)	B (45%)	B (42%)	B (54%)
Ch 18	A (14%)	A (10%)	A (27%)	A (42%)	B (42%)	A (36%)	B (40%)	B (44%)	B (39%)
Ch 19	A (9%)	A (29%)	A (34%)	A (52%)	-- (57%)	A (51%)	B (54%)	B (59%)	B (57%)
Ch 20	A (4%)	A (12%)	A (19%)	A (28%)	B (37%)	A (39%)	B (43%)	B (43%)	B (51%)
CP	A (10%)	A (23%)	A (31%)	A (40%)	B (45%)	A (46%)	B (46%)	B (51%)	B (53%)

O uso de sistemas de classificação com base no modelo RGB para a

identificação do grau de maturação vem apresentando êxito na análise de frutos e palmáceas em geral (ALFATNI et al., 2008; MAY e AMARAN, 2011; MOHAMMADI et al., 2015; PAMORNNAK et al., 2015). No entanto, em alguns casos onde a variação colorimétrica entre estádios é sutil, o modelo RGB pode apresentar dificuldades em distinguir estádios de maturação (ISHAK et al., 2000; GHAZALI et al., 2009). Além do mais, os valores RGB podem ser influenciados pela intensidade da luz incidida (HUDZARI et al., 2010), fato que é minimizado ao se realizar a análise pelo modelo HSI, devido ao fato de se poder analisar separadamente o matiz e a saturação. TAN et al. (2010) demonstraram que a conversão do modelo RGB para o modelo HSI permitiu a distinção do grau de maturação dos frutos da palmácea *Elaeis guineenses* pela análise da propriedade colorimétrica do matiz, sendo que os resultados não foram afetados pela variação de radiação incidente nos frutos.

Desta forma, embora o classificador baseado no modelo RGB apresentem resultados satisfatórios, a análise pelo modelo HSI, utilizando o matiz como parâmetro indicador de maturação, se mostra a alternativa mais recomendada para o desenvolvimento de sistemas que permita a determinação do ponto de colheita dos frutos de macaúba com os teores de óleo mais elevados.

## 5.6.CONCLUSÃO

As redes neurais desenvolvidas em função dos modelos de cores demonstram potencial para classificar frutos no ponto de colheita. As classificações geradas pelas redes neurais baseadas nos modelos RGB (RN-RGB) e no parâmetro do matiz (RN-H), foram consideradas significativas e estatisticamente equivalentes quando comparadas pelo teste Z a um nível de significância de 0,01.

O classificador utilizando o parâmetro matiz (RN-H) apresentou maior acurácia na classificação ao avaliar os frutos em todas as semanas analisadas, sendo portanto, o mais recomendado para determinar os frutos em ponto de colheita

Foi observado um aumento nos teores de óleo ao longo da maturação dos frutos, sendo obtidos os maiores níveis nos estádio considerados ideais para colheita. O fato indicou que por estarem associadas ao estádio de maturação do fruto, as propriedades colorimétricas podem ser um indicador da faixa de teor de óleo encontrada no fruto.

## 5.7.REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFIAS

ABDULLAH, M. Z.; GUAN, L. C.; LIM, K. C.; KARIM, A. A. The applications of computer vision system and tomographic radar imaging for assessing physical properties of food. **Journal of Food Engineering**, v. 61, n. 1, p. 125-135, 2004.

AGRIANUAL. **Biocombustível**. p. 25 – 29, 2012.

ALFATNI, M. S. M.; SHARIFF, A. R. M.; SHAFRI, H. Z. M.; SAAED, O. M. B.; ESHANTA, O. M.. Oil palm fruit bunch grading system using red, green and blue digital number. **Journal of Applied Sciences**, v. 8, n. 8, p. 1444-1452, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS DE ÓLEOS VEGETAIS (ABIOVE). Biodiesel: matéria-prima para produção – Fevereiro de 2015. ANP/ABIOVE. **Estatísticas do biodiesel**. Fevereiro, 2015.

AVILA, F.; MORA, M.; OYARCE, M.; ZUÑIGA, A.; FREDES, C. A method to construct fruit maturity color scales based on support machines for regression: Application to olives and grape seeds. **Journal of Food Engineering**, v. 162, p. 9-17, 2015.

BENHURA, C., BENHURA, M. A. N., MUCHUWETI, M., & GOMBIRO, P. E. Assessment of the colour of Parinari curatellifolia fruit using an image processing computer software package. **International Journal of Agricultural and Food Research (IJAFR)**, v. 2, n. 4, 2014.

BRAZAITYTĖ, A., SAKALAUŠKIENĖ, S., SAMUOLIENĖ, G., JANKAUSKIENĖ, J., VIRŠILĖ, A., NOVIČKOVAS, A; DUCHOVSKIS, P. The effects of LED illumination spectra and intensity on carotenoid content in Brassicaceae microgreens. **Food chemistry**, v. 173, p. 600-606, 2015.

CHITARRA, M. I. F.; CHITARRA, A. B. Pós-colheita de frutos e hortaliças: fisiologia e manuseio. **2º ed. Lavras: UFLA**, 785 p. 2005.

CHOONG, T. S.; ABBAS, S.; SHARIFF, A. R.; HALIM, R.; ISMAIL, M. H. S.; YUNUS, R.; AHMADUN, F. R.. Digital image processing of palm oil fruits. **International Journal of Food Engineering**, v. 2, n. 2, 2006.

CLEMENT, C.R.; PÉREZ, E.L.; LEEUWEN, J. O potencial das palmeiras tropicais no Brasil: acertos e fracassos das últimas décadas. **Agrociência**. v.9, p.67-71, 2005.

CONGALTON, R. G. and MEAD, R. A review of three discrete multivariate analysis techniques used in assessing the accuracy of remotely sensed data from error matrices. **Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on**, n. 1, p. 169-174, 1986.

DEMUTH, H.; BEALE, M.; HAGAN, M. Neural network toolbox™ 6. **User's guide**, 2008.

FADILAH, N.; MOHAMAD-SALEH, J.; ABDUL HALIM, Z.; IBRAHIM, H.; SYED ALI, S. S. Intelligent color vision system for ripeness classification of oil palm fresh fruit bunch. **Sensors**, v. 12, n. 10, p. 14179-14195, 2012.

FARIAS, J. F. D.; ARAÚJO NETO, S. E. D.; ÁLVARES, V. D. S.; FERRAZ, P. A.; FURTADO, D. T.; SOUZA, M. L. D. Maturation and determination of the harvest point of envira-caju fruit. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v.33, n.3, 730-736p. 2011.

GHAZALI, K. H.; SAMAD, R.; ARSHAD, N. W.; Karim, R.A. Image Processing Analysis of Oil Palm Fruits for Automatic Grading. **In Proceedings of the International Conference on Instrumentation, Control & Automation**. 2009.

GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. E. Digital image processing. 3rd ed. **Upper Saddle River: Prentice Hall**, 954 p., 2008.

HIANE P.A.; RAMOS FILHO M.M.; RAMOS M.I.L.; MACEDO M.L.R. Bocaiuva, *Acrocomia aculeata (Jacq.) Lodd.*, Pulp and Kernel Oils; characterization and Fatty

acid Composition. Braz. **Journal Food and Technology**. v.8, p.256-259, 2005.

HUDZARI, R.; ISHAK, W. W.; NOORMAN, M. Parameter acceptance of software development for oil palm fruit maturity prediction. **J. Softw. Eng**, v. 4, p. 244-256, 2010.

INSTITUTO ADOLFO LUTZ (São Paulo – Brasil). Métodos físico-químicos para análise de alimentos: normas analíticas do Instituto Adolfo Lutz. 4ª Ed. Brasília (DF): **ANVISA**; p.96, 2005.

ISHAK, W.; ISMAIL, W.; BARDAIE, M.Z.; HAMID, A. M. A. Optical Properties for Mechanical Harvesting of Oil Palm FFB. **Journal of Oil Palm Research**. 12, 38-45p. 2000.

ISHAK, W. I. W.; HUDZARI, R. M. Image based modeling for oil palm fruit maturity prediction. *Journal of Food, Agriculture & Environment*, v. 8, n. 2, p. 469-476, 2010.

ISMAIL, W. I. W.; RAZALI, M. H. Hue optical properties to model oil palm fresh fruit bunches maturity index. In: **Proceedings of World Multi-Conference on Systemics, Cybernetics and Pattern Recognition**. p. 168-173. 2010.

JAFFAR, A.; JAAFAR, R.; JAMIL, N.; LOW, C. Y.; ABDULLAH, B. Photogrammetric grading of oil palm fresh fruit bunches. **Int. J. Mech. Mechatron. Eng**, v. 9, p. 18-24, 2009.

JI, W.; KOUTSIDIS, G.; LUO, R.; HUTCHINGS, J.; AKHTAR, M.; MEGIAS, F.; BUTTERWORTH, M. A digital imaging method for measuring banana ripeness. **Color Research & Application**, v. 38, n. 5, p. 364-374, 2013.

LANDIS J. R.; KOCH G. G. The measurement of observer agreement for categorical data. **Biometrics** v. 33, p.159-75, 1977.

LÓPEZ CAMELO, A. F.; GÓMEZ, P. A. Comparison of color indexes for tomato ripening. **Horticultura Brasileira**, v. 22, n. 3, p. 534-537, 2004.

LORENZI, G. M. A. C.; PIMENTEL, L. D.; DE PAULA, S. R.; NEGRELLE, R. R.

B.; PAES, J. M. V. Prospecção da cadeia produtiva dos frutos da palmeira macaúba no estado de Minas Gerais. **Informe Agropecuário- EPAMIG**. Belo horizonte. v.32, n.265., p.41-51, 2011.

MA, G., ZHANG, L., KATO, M., YAMAWAKI, K., KIRIIWA, Y., YAHATA, M.; MATSUMOTO, H. Effect of the combination of ethylene and red LED light irradiation on carotenoid accumulation and carotenogenic gene expression in the flavedo of citrus fruit. **Postharvest Biology and Technology**, v. 99, p. 99-104, 2015.

MANICA, I.; ICUMA, I.M.; JUNQUEIRA, N.T.V.; SALVADOR, J.O.; MOREIRA, A.; MALAVOLTA, E. Fruticultura tropical. **Editora Cinco continentes**. Cap6. 373p. Porto Alegre, 2000.

MAKKY, M; SONI, P. Development of an automatic grading machine for oil palm fresh fruits bunches (FFBs) based on machine vision. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 93, p. 129-139, 2013.

MAKKY, M.; SONI, P.; SALOKHE, V. M. Automatic non-destructive quality inspection system for oil palm fruits. **International Agrophysics**, v. 28, n. 3, p. 319-329, 2014.

MATSIMBE, S. F. S.; MOTOIKE, S.Y.; PINTO, F.A.C.; LEITE, H.G.; MARCATTI, G.H. Prediction of oil content in the mesocarp of fruit from the macauba palm using spectrometry1. **Revista Ciência Agronômica**, v. 46, n. 1, p. 21-28, 2015.

MENDOZA, F.; DEJMEK, P.; AGUILERA, J. M. Calibrated color measurements of agricultural foods using image analysis. **Postharvest Biology and Technology**, v. 41, n. 3, p. 285-295, 2006.

MAY, Z.; AMARAN, M. H. Automated oil palm fruit grading system using artificial intelligence. **Int. J. Eng. Sci**, v. 11, p. 30-35, 2011.

MOHAMMADI, V.; KHEIRALIPOUR, K.; GHASEMI-VARNAMKHASTI, M. Detecting maturity of persimmon fruit based on image processing technique. **Scientia Horticulturae**, v. 184, p. 123-128, 2015.

MOKJI, M. M.; ABU BAKAR, S. A. R. Starfruit classification based on linear hue computation. **Elektrika**, v. 9, n. 2, p. 14-19, 2007.

MOTA, C.S; CORRÊA, T.R.; GROSSI, J.A.S., CASTRICINI, A, RIBEIRO, A.S. Exploração sustentável da macaúba para produção de biodiesel: colheita, pós-colheita e qualidade dos frutos. **Informe Agropecuário EPAMIG**. Belo horizonte, v.32, n.265, p.41-51, 2011.

MOTOIKE, S.J.; CARVALHO, M.; PIMENTEL, L.D.; KUKI, K.N.; PAES, J.M.V.; DIAS, H.C.T.; SATO, A.Y. A cultura da macaúba: implantação e manejo de cultivos racionais. **Editora UFV**. Viçosa , Minas Gerais, p.61, 2013.

MONTOYA, S.G. Caracterização do desenvolvimento do fruto da palmeira macaúba. **Dissertação**. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, MG, p.51, 2013.

MOOZ, E.D., CASTELUCCI, A. C. L.; SPOTO, M. H. F. **Revista Brasileira de Pesquisa em Alimentos**, Campo Mourão (PR), v.3, n.2, p.86-89, 2012.

NJOROGE, J. B.; NINOMIYA, K.; KONDO, N.; TOITA, H. Automated fruit grading system using image processing. SICE 2002. **Proceedings of the 41st SICE Annual Conference**. v.2, p.1346-1351, 2002.

OTSU, N. A threshold selection method from gray-level histograms. **Automatica**, v. 11, n. 285-296, p. 23-27, 1975.

PADILLA, D. B.; TORRES, G. S. Image analysis for automatic feature estimation of the *Mangifera indica* fruit. **Ingeniería y Desarrollo**, v. 31, n. 1, p. 84-104, 2013.

PAMORNNAK, B.; LIMSIRORATANA, S.; CHONGCHEAWCHAMNAN, M. Oil content determination scheme of postharvest oil palm for mobile devices. **Biosystems Engineering**, v. 134, p. 8-19, 2015.

PEDRINI, H.; SCHWARTZ, W. R. Análise de Imagens Digitais: Princípios,

Algoritmos e Aplicações. **1. ed. São Paulo: Thomson Learning Edições**, v. 1. 508 p. 2007.

RAJKUMAR, P.; WANG, N.; EIMASRY, G.; RAGHAVAN, G. S. V.; GARIEPY, Y. Studies on banana fruit quality and maturity stages using hyperspectral imaging. **Journal of Food Engineering**, v. 108, n. 1, p. 194-200, 2012.

RAZALI, M.; ISMAIL, W.; ISHAK, W.; RAMLI, A. R.; SULAIMAN, M.; HARUN, M. Development of image based modeling for determination of oil content and days estimation for harvesting of fresh fruit bunches. **International Journal of Food Engineering**, v. 5, n. 2, 2009.

ROCHA, A.; HAUAGGE, D. C.; WAINER, J.; GOLDENSTEIN, S. Automatic fruit and vegetable classification from images. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 70, n. 1, p. 96-104, 2010.

ROSCOE, R.; RICHETTI, A.; MARANHO, E. Análise de viabilidade técnica de oleaginosas para produção de biodiesel em Mato Grosso do Sul. **Revista Política Agrícola**, v.16, p.48-59, 2007.

SAEED, O. M. B.; SANKARAN, S.; SHARIFF, A. R. M.; SHAFRI, H. Z. M.; EHSANI, R.; ALFATNI, M. S.;HAZIR, M. H. M.. Classification of oil palm fresh fruit bunches based on their maturity using portable four-band sensor system. **Computers and Electronics in Agriculture**. v.82, p.5560, 2012.

SAITO, Y.; HATANAKA, T.; UOSAKI, K.; SHIGETO, H. Neural network application to eggplant classification. In: **Knowledge-Based Intelligent Information and Engineering Systems**. Springer Berlin Heidelberg, p. 933-940, 2003.

SHAH RIZAM, M. S. B.; FARAH YASMIN, A. R.; AHMAD IHSAN, M. Y.; SHAZANA, K.. Non-destructive watermelon ripeness determination using image processing and artificial neural network (ANN). **International Journal of Electrical and Computer Engineering**, v. 4, n. 6, 2009.

SIRISATHITKUL, Y.; THUMPEN, N.; PUANGTONG, W. Automated chokun

orange maturity sorting by color grading. **Walailak Journal of Science and Technology (WJST)**, v. 3, n. 2, p. 195-205, 2011.

SOUZA, C.T.F. Desenvolvimento, maturação e sistemas de colheita de frutos da macaúba (*Acrocomia aculeata*). **Dissertação**. Universidade Católica Dom Bosco. Campo Grande, MS. p.75, 2013.

STUDMAN, C. J. Computers and electronics in postharvest technology-a review. **Computers and electronics in Agriculture**, v. 30, n. 1, p. 109-124, 2001.

SUNILKUMAR, K. and BABU, D.S. Surface color based prediction of oil content in oil palm (*Elaeis guineensis Jacq.*) fresh fruit bunch. **African Journal of Agricultural Research**, v. 8, n. 6, p. 564-569, 2013.

SUSILAWATI, M. F.; MANAF, A. A.; CHUPRAT, S. The Use of Elimination Method and Nearest Neighbor for Oil Palm Fruit Ripeness Indicator. **In: ICSECS (1)**. p. 674-686.2011.

TAN, Y. A., LOW, K. W., LEE, C. K., & LOW, K. S. Imaging technique for quantification of oil palm fruit ripeness and oil content. **European journal of lipid science and technology**, v. 112, n. 8, p. 838-843, 2010.

WANISMAIL, W. I.; BARDAIE, M. Z.; ABDULHAMID, A. M.. Optical properties for mechanical harvesting of oil palm FFB. **Journal of Oil Palm Research**, v. 12, n. 2, p. 38-45, 2000.

WISUTIAMONKUL, A.; PROMDANG, S.; KETSA, S.; VAN DOORN, W. G. Carotenoids in durian fruit pulp during growth and postharvest ripening. **Food chemistry**, v. 180, p. 301-305, 2015.

WU, D.; SUN, D. Colour measurements by computer vision for food quality control—A review. **Trends in Food Science & Technology**, v. 29, n. 1, p. 5-20, 2013.

## **CAPÍTULO 6**

### **CONCLUSÃO GERAL**

## 6. CONCLUSÃO GERAL

Com base nos resultados foi possível concluir que:

Observou-se um aumento da atividade biológica ao longo das semanas após a florada dos frutos de macaúba ao se analisar diretamente o epicarpo, apresentando uma relação linear significativa entre atividade biológica e semanas de maturação. A atividade biológica mensurada a partir da técnica do *biospeckle laser* se apresentou como um eficiente indicador para a definição do ponto de colheita, demonstrando que os frutos podem ser considerados próximos ao ponto de maturação fisiológica, sendo considerados aptos para colheita, a partir 59<sup>a</sup> semanas após a florada.

A classificação pela rede neural em função da atividade biológica, classificou frutos a partir da 59<sup>o</sup> semana após a florada como aptos para colheita, apresentando uma exatidão global de 82,29% e um índice Kappa significativo de 0,65. A atividade biológica mensurada pelo *biospeckle laser* apresentou correlação significativa com o teor de óleo onde o aumento da atividade biológica ao longo das semanas avaliadas foi correlacionado com o aumento no teor de óleo na polpa (mesocarpo) dos frutos.

Ao analisar a atividade biológica e a firmeza na polpa dos frutos, foi constatado uma correlação significativa onde o aumento da atividade biológica foi associada a redução da firmeza dos frutos de macaúba. A atividade biológica e a firmeza durante a fase de armazenamento, após os frutos terem atingidos a maturação fisiológica, também apresentaram correlação significativa, no entanto, a redução da atividade biológica foi associada a redução da firmeza dos frutos de macaúba. O alto grau de associação da atividade biológica e da firmeza da polpa em diferentes instantes de maturação dos frutos, demonstrou que a técnica ótica do *biospeckle laser* também pode ser um eficiente indicador não invasivo ao se avaliar o grau de maturação na polpa dos frutos de macaúba, auxiliando na determinação do momento de colheita.

Ao utilizar as propriedades colorimétricas como parâmetros para o desenvolvimento dos classificadores por meio das redes neurais, concluiu-se que as classificações baseadas no modelos RGB e no parâmetro do matiz (RN-H), foram consideradas significativas e estatisticamente equivalentes, também classificando os frutos como adequados para colheita a partir da 59<sup>a</sup> semana após a florada. O classificador utilizando o parâmetro matiz apresentou maior acurácia na classificação ao avaliar os frutos em todas as semanas analisadas, sendo portanto, o mais

recomendado para determinar os frutos em ponto de colheita, inclusive ao se comparar com a atividade biológica como parâmetro do classificador.

Foi observado um aumento nos teores de óleo ao longo da maturação dos frutos, sendo obtidos os maiores níveis nos estádio considerados ideais para colheita. Por estarem associadas ao estádio de maturação do fruto, tanto a atividade biológica mensurada pelo *biospeckle laser*, quanto as propriedades colorimétricas, podem ser utilizadas como um indicador da faixa de teor de óleo encontrada no fruto.