



Classificação de Frutos de Açaí Cultivados em Sistema Agroflorestal e em Monocultura por Imageamento Hiperespectral no Infravermelho Próximo

Manoel F. R. Ferreira¹; Tainá F. Franklim¹; Neirivaldo C. da Silva¹

¹ Universidade Federal do Pará (UFPA), Faculdade de Química (FAQUI), Instituto de Ciências Exatas e Naturais (ICEN), Centro de Valorização de Compostos Bioativos da Amazônia (CVACBA), Belém, Pará, Brasil
manoeffernandoribeiro982@gmail.com

Palavras-Chave: espectroscopia NIR, quimiometria, PLS-DA

Introdução

A cadeia produtiva do açaí (*Euterpe oleracea* Mart.) ocupa posição central na economia agrícola do Pará, responsável por 90,4% da produção nacional do fruto, da ordem de 1,7 milhão de toneladas (FAPESPA, 2024). Essa produção divide-se entre o extrativismo em várzea nativa e o cultivo intensivo em monocultura, dois modelos que diferem substancialmente quanto ao impacto ambiental. Sistemas agroflorestais (SAFs), por reproduzirem parte da diversidade estrutural da floresta nativa, favorecem a conservação do solo e reduzem a dependência de insumos químicos, alinhando-se aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da ONU; já a monocultura, embora mais produtiva por área, tende a empobrecer o solo e a aumentar a vulnerabilidade a pragas. Diante da crescente exigência de mercados nacionais e internacionais por rastreabilidade e certificação de origem sustentável, a diferenciação objetiva entre frutos oriundos desses dois sistemas de cultivo torna-se uma demanda analítica relevante para a valorização da cadeia produtiva amazônica. Métodos físico-químicos tradicionais de composição centesimal são precisos, porém destrutivos, demorados e inviáveis para triagem em larga escala, o que motiva a busca por alternativas não destrutivas e rápidas, como a espectroscopia no infravermelho próximo (NIR).

A espectroscopia NIR é técnica consolidada para caracterização não destrutiva de matrizes biológicas, por captar informações vibracionais de ligações químicas como C–H, O–H e N–H, comuns em compostos orgânicos (Pasquini, 2018). Sua variante por imageamento (HSI-NIR) combina as dimensões espectral e espacial, gerando um hipercubo de dados em que cada pixel contém um espectro completo, o que a torna particularmente adequada para amostras heterogêneas, como frutos com variação de composição ao longo da superfície (Manley, 2014). Essa técnica já foi empregada com sucesso na discriminação de frutos de açaí por espécie (Dall'Acqua et al., 2015; Cunha Júnior et al., 2015) e em aplicações de controle de qualidade e detecção de adulteração da polpa (Caramês; Alamar; Pallone, 2019), mas a discriminação por sistema de cultivo (monocultura versus SAF) permanece pouco explorada na literatura.

Este trabalho teve como objetivo desenvolver um método analítico baseado em imagens hiperespectrais NIR para classificar frutos de açaí cultivados em sistema de monocultura e em sistema agroflorestal de várzea, construindo um fluxo analítico completo, do pré-processamento das imagens hiperespectrais brutas até a modelagem quimiométrica supervisionada.

Material e Métodos



A coleta de frutos de açaí foi realizada em campo, com auxílio de pesquisadores de pós-graduação do Centro de Valorização de Compostos Bioativos da Amazônia (CVACBA), em áreas de monocultura e de sistema agroflorestal (SAF) de várzea nos municípios de Santo Antônio do Tauá e Abaetetuba (PA), registrando-se coordenadas geográficas, forma de cultivo e tipo de solo. Foram analisados 27 frutos de monocultura e 32 de SAF de várzea, incluindo uma amostra independente de 8 frutos nativos de SAF da região de Abaetetuba, transportados e armazenados a -18°C até a análise.

As imagens hiperespectrais foram obtidas em câmera SWIR (1000–2500 nm) com sistema de varredura push-broom (Specim), tempo de exposição de 6,00 ms, taxa de quadros de 150,00 fps e velocidade de esteira de 50 m/min, sob temperatura controlada de $22,47^{\circ}\text{C}$, com calibração prévia de branco e preto para conversão em refletância relativa.

O processamento dos cubos hiperespectrais foi realizado no software MATLAB com o toolbox HYPER-Tools (Mobaraki; Amigo, 2018): remoção do plano de fundo (esteira) e definição da região de interesse (ROI) por Análise de Componentes Principais (PCA), seguida de pré-processamento espectral pelo método SNV (Standard Normal Variate) no PLS_Toolbox, para correção de efeitos de espalhamento de luz.

A classificação dos frutos segundo o sistema de cultivo (MN – monocultura; VZ – SAF de várzea) foi realizada por Regressão de Mínimos Quadrados Parciais com Análise Discriminante (PLS-DA), na qual a variável resposta é codificada como categórica binária e o algoritmo constrói variáveis latentes que maximizam a variância explicada em X e a covariância entre X e Y (Barker; Rayens, 2003). O modelo foi construído com 8 variáveis latentes, número definido por validação cruzada (Venetian Blinds) como o que minimiza o erro de classificação. As amostras foram divididas em conjuntos de treinamento (14 MN e 12 VZ) e teste (13 MN e 20 VZ), além da amostra independente de Abaetetuba. O desempenho dos modelos foi avaliado por sensibilidade, especificidade e precisão, calculadas a partir da matriz de confusão (verdadeiros e falsos positivos e negativos).

Resultados e Discussão

O modelo PLS-DA construído discriminou os frutos de açaí segundo o sistema de cultivo a partir de suas assinaturas espectrais. Os mapas de classificação do conjunto de treinamento (Figura 1) mostraram boa concordância entre classes preditas e reais, com grupamentos de pixels majoritariamente homogêneos dentro de cada fruto, indicando variabilidade espectral intrafruto pequena em relação à variabilidade entre classes. No conjunto de teste, o desempenho visual foi similar ao do treinamento. Já para a amostra independente de fruto nativo de Abaetetuba, a classificação mostrou-se mais heterogênea, com mistura de pixels MN e VZ no mesmo fruto, sugerindo que a origem geográfica distinta introduz variabilidade espectral ainda não capturada pelo modelo; ainda assim, a maioria dos frutos foi corretamente classificada pelo critério de maioria de pixels.

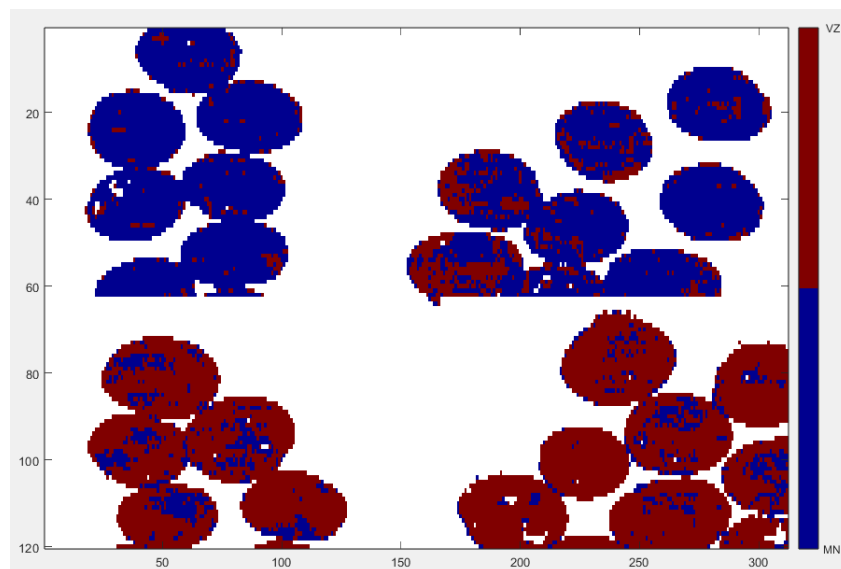


Figura 1 – Classificação dos frutos de açaí do conjunto de treinamento pelo modelo PLS-DA (VZ – SAF de várzea, em vermelho; MN – monocultura, em azul). Fonte: autoria própria.

Quantitativamente, o modelo apresentou sensibilidade, especificidade e precisão entre 84% e 90% nos conjuntos de treinamento e teste (Tabela 1), o que indica que a técnica é capaz de capturar diferenças espectrais reais entre os dois sistemas de cultivo, embora em patamar moderado quando comparado a modelos de autenticação alimentar publicados na literatura, que costumam reportar valores acima de 90% para classes espectralmente mais distintas (Caramês; Alamar; Pallone, 2019).

Tabela 1 – Sensibilidade, especificidade e precisão dos modelos de classificação para os conjuntos de treinamento e teste.

Métrica	Treino – MN	Treino – VZ	Teste – MN	Teste – VZ
Sensibilidade	87%	84%	86%	90%
Especificidade	84%	87%	90%	86%
Precisão	86%	86%	86%	90%

Fonte: autoria própria.

A interpretação dos coeficientes de regressão do modelo PLS-DA apontou três faixas espectrais como as mais relevantes para a discriminação entre classes: 1100–1200 nm, associada ao segundo sobretom de estiramento C–H, presente majoritariamente em lipídios (Workman; Weyer, 2012; Manley, 2014); 1500–1600 nm, relacionada ao primeiro sobretom O–H, associado ao teor de água livre e ligada nos tecidos do fruto; e 1800–1900 nm, região de bandas de combinação O–H, também ligada à água, mas sensível a variações na matriz de carboidratos e compostos fenólicos da polpa (Pasquini, 2018). Esse resultado é consistente com a composição do açaí, rico em água, lipídios e compostos fenólicos, cujas ligações químicas geram bandas de absorção características no NIR (Silva et al., 2017).

Esses resultados demonstram a viabilidade técnica de uma ferramenta não destrutiva, rápida e potencialmente transferível para diferenciar a origem de cultivo do açaí, com aplicabilidade



direta para rastreabilidade e valorização comercial de sistemas agroflorestais e de monocultura, alinhando-se à crescente exigência de mercados por certificação de origem sustentável na cadeia produtiva amazônica. O desempenho ainda moderado do modelo e o tamanho amostral reduzido, no entanto, indicam que os resultados devem ser interpretados como prova de conceito, e não como modelo pronto para aplicação industrial.

Conclusões

O presente trabalho alcançou o objetivo proposto, desenvolvendo um método analítico baseado em imageamento hiperespectral NIR capaz de classificar frutos de açaí segundo o sistema de cultivo de origem, monocultura ou SAF de várzea, com sensibilidade, especificidade e precisão entre 84% e 90% nos conjuntos de treinamento e teste. A interpretação dos coeficientes do modelo apontou as regiões de 1100–1200 nm, 1500–1600 nm e 1800–1900 nm como as de maior peso discriminante, associadas a compostos lipídicos (C–H) e hídricos (O–H), o que indica que a diferenciação entre sistemas está ancorada em variações composicionais plausíveis. O trabalho demonstra a viabilidade técnica de uma ferramenta não destrutiva e rápida para diferenciação de origem de cultivo do açaí, com potencial de aplicabilidade para rastreabilidade e valorização comercial de sistemas agroflorestais e de monocultura. O desempenho moderado do modelo e o tamanho amostral reduzido (27 frutos de monocultura e 32 de SAF de várzea) indicam que os resultados devem ser interpretados como prova de conceito; trabalhos futuros devem priorizar a ampliação do conjunto amostral, incluindo diferentes origens geográficas e épocas de colheita, e a validação por métodos analíticos de referência.

Agradecimentos

Os autores agradecem à PROPESP/UFPA pela bolsa PIBIC e ao CVACBA pela infraestrutura disponibilizada para o desenvolvimento desta pesquisa.

Referências

- BARKER, M.; RAYENS, W. Partial least squares for discrimination. *Journal of Chemometrics*. 17(3), 166–173, 2003.
- CARAMÊS, E. T. S.; ALAMAR, P. D.; PALLONE, J. A. L. Detection and identification of açaí pulp adulteration by NIR and MIR as an alternative technique: control charts and classification models. *Food Research International*. 123, 704–711, 2019.
- CUNHA JÚNIOR, L. C.; NARDINI, V.; KHATIWADA, B. P.; TEIXEIRA, G. H. A.; WALSH, K. B. Classification of intact açaí (*Euterpe oleracea* Mart.) and juçara (*Euterpe edulis* Mart.) fruits based on dry matter content by means of near infrared spectroscopy. *Food Control*. 50, 630–636, 2015.
- DALL'ACQUA, Y. G.; CUNHA JÚNIOR, L. C.; NARDINI, V.; LOPES, V. G.; PESSOA, J. D. C.; TEIXEIRA, G. H. A. Discrimination of *Euterpe oleracea* Mart. (açaí) and *Euterpe edulis* Mart. (juçara) intact fruit using near-infrared (NIR) spectroscopy and linear discriminant analysis. *Journal of Food Processing and Preservation*. 39(6), 2856–2865, 2015.
- FAPESPA – FUNDAÇÃO AMAZÔNIA DE AMPARO A ESTUDOS E PESQUISAS. Nota técnica: conjuntura da economia do açaí 2024. Belém: FAPESPA, 2024.



MANLEY, M. Near-infrared spectroscopy and hyperspectral imaging: non-destructive analysis of biological materials. *Chemical Society Reviews*. 43(24), 8200–8214, 2014.

MOBARAKI, N.; AMIGO, J. M. HYPER-Tools: a graphical user-friendly interface for hyperspectral image analysis. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*. 172, 174–187, 2018.

PASQUINI, C. Near infrared spectroscopy: a mature analytical technique with new perspectives — a review. *Analytica Chimica Acta*. 1026, 8–36, 2018.

SILVA, A. K. N. da; BECKMAN, J. C.; RODRIGUES, A. M. da C.; SILVA, L. H. M. da. Composição nutricional e capacidade antioxidante da polpa de açaí (*Euterpe oleracea* M.). *Revista Brasileira de Tecnologia Agroindustrial*. 11(1), 2205–2216, 2017.

WORKMAN JR., J.; WEYER, L. Practical guide and spectral atlas for interpretive near-infrared spectroscopy. 2. ed. Boca Raton: CRC Press, 2012.