

Quimiometria e infravermelho: uma análise forense para falsificação do papel moeda brasileiro

DOI: 10.5281/zenodo.18462301

Anthony Monteiro Lima ^{a*}

Fraudes envolvendo falsificação do papel moeda são extremamente comuns no Brasil e se mostram cada vez mais difíceis de se localizar. Há um crescimento da utilização de técnicas espectroscópicas para atividades forenses, tendo em vista seu caráter não destrutivo de amostra. O presente artigo busca revisar o desenvolvimento de um estudo da utilização de espectroscopia de infravermelho aliada com conceitos de quimiometria para se obter uma análise forense precisa e de baixo custo.

Fraud involving the counterfeiting of banknotes is extremely common in Brazil and is proving increasingly difficult to detect. There is a growing use of spectroscopic techniques for forensic activities, given their non-destructive nature. This article aims to review the development of a study using infrared spectroscopy combined with chemometrics concepts to obtain a precise and low-cost forensic analysis.

^aUniversidade de Brasília (UnB). Campus Darcy Ribeiro. Instituto de Química (IQ/UnB).

*E-mail: anthonymonteiro2877@gmail.com

Palavras-chave: quimiometria; infravermelho; ciência forense

ACEITO EM 11 DE JANEIRO DE 2026,
APROVADO EM 25 DE JANEIRO DE 2026,
PUBLICADO EM 03 DE FEVEREIRO DE 2026.

Introdução

As ciências forenses são dedicadas ao estudo e interpretação de vestígios de infrações e crimes, com o intuito de colaborar com as autoridades na elaboração de hipóteses para autores, excluir suspeitos e confirmar métodos utilizados nas práticas dos delitos. A evolução constante da tecnologia permite que, atualmente, estas ciências sejam multidisciplinares, envolvendo diversas áreas do conhecimento e incluindo, portanto, a química.¹

A química, por sua vez, tem um papel importantíssimo dentro da perícia forense, visto que há uma necessidade de eficácia, padronização e manutenção da integridade do vestígio.^{1,2} Para a garantia destas necessidades, a química possui diversos métodos analíticos que buscam estes mesmos objetivos, principalmente no âmbito forense que envolve documentos, conhecido como documentologia ou perícia documental. Este tipo de perícia possui foco na análise macro e microscópica de materiais que possam determinar a origem e atribuir autenticidade a um documento, como papéis, tintas, marcas d'água e outros. Por isso, a análise minuciosa que não degrada a amostra, mantendo-a o mais próximo ao estado de quando encontrada pela primeira vez, é sempre preferencial.^{1,2,3}

Dentre as diversas infrações cometidas com documentos, uma das mais conhecidas e mais recorrentes é a falsificação do papel-moeda.^{4,5} O primeiro crime desse

âmbito julgado no Brasil data do ano de 1756, quando o país era ainda dividido em capitâncias.⁴ De acordo com dados do Banco Central do Brasil, apenas no mês de dezembro de 2025 foi contabilizado um total de 184.385 cédulas falsificadas apreendidas, sendo a maioria (87.793) cédulas de 100 Reais.⁶ A segunda família do Real, lançada em 2010 pelo Banco Central, possui diversos elementos de segurança em suas cédulas que dificultam a sua falsificação.⁷ Mesmo assim, com os avanços tecnológicos, a identificação de cédulas falsas se torna uma tarefa propícia para métodos de análise extremamente sensíveis, tendo em vista que muitas técnicas podem ser destrutivas e as análises por técnicas ópticas e microscópicas, que preservam a integridade da amostra, podem ser inconclusivas.^{3,5}

Um dos métodos mais empregados na perícia documental é a utilização do Comparador Espectral de Vídeo, VSC (do inglês *Video Spectral Comparator*), que consiste na combinação de várias fontes luminosas, incluindo luz visível (VIS), ultravioleta (UV) e infravermelho (IR). Porém, esta técnica possui aplicações muito específicas em que se é possível diferenciar um aspecto caracterizador do documento por um único comprimento de onda, além de não ser tão preciso quanto técnicas espectroscópicas.^{5,8} Sendo assim, técnicas sensíveis como espectroscopia no infravermelho são alternativas seguras ao VSC, sendo empregadas juntamente com métodos multivariados de quimiometria devido à complexidade dos materiais e diversidade de dados obtidos pela análise espectroscópica. A análise de componentes

principais (PCA) e análise discriminante de mínimos quadrados parciais (PLSDA) são as análises quimiométricas mais empregadas no ramo forense.^{2,5}

Tendo em vista as questões expostas, Braz e colaboradores elaboraram um estudo para desenvolver uma metodologia aplicável às perícias documentais em cédulas do Real, com o objetivo de identificar cédulas falsificadas por técnicas de espectroscopia FTIR associadas com quimiometria. O presente artigo tem como objetivo revisar o trabalho destes pesquisadores e sua metodologia utilizando espectroscopia ATR-FTIR (espectroscopia na região do infravermelho com transformada de Fourier e reflectância total atenuada) e MicroNIR (micro espectroscopia na região do infravermelho próximo), em conjunto com as análises por PCA e PLSDA, para diferenciar cédulas genuínas de cédulas falsificadas ao analisar elementos de segurança e outras regiões pontuais de cédulas de 100 Reais, visando o baixo custo, rapidez e a preservação da amostra.⁵

Metodologia

A espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) consiste em uma técnica que, como todas as técnicas espectroscópicas, analisa a interação da matéria com a radiação, neste caso a radiação infravermelha. A absorção dessa radiação se dá pelo momento dipolar intermolecular, cujas vibrações são únicas para cada grupo funcional. Este tipo de espectroscopia é geralmente dividido pela região do infravermelho utilizada para irradiar a amostra, podendo ser próxima (NIR, do inglês *near infrared*), no meio (MIR, *mid infrared*) ou distante (FIR, *far infrared*) do visível. O infravermelho próximo fornece informações sobre grupos funcionais, já as regiões mais afastadas permitem caracterizar as ligações mais detalhadamente. As análises de infravermelho são geralmente realizadas com amostras líquidas, mas com o advento da técnica de reflectância total atenuada (ATR-IR), é possível utilizar amostras sólidas, pois esta técnica comprehende materiais espessos e complexos como a superfície de objetos pequenos.^{5,9}

A quimiometria, por sua vez, se propõe a resolver problemas da química com uma variedade de métodos não necessariamente relacionados a ela. Esses métodos provêm da matemática, estatística e computação, com o objetivo de obter o máximo de informação química a partir de dados precisos, assim podendo selecionar ou planejar experimentos com eficácia e maiores chances de sucesso. A análise correta dos dados obtidos em experimento permite identificar problemas,

interferências, ou prevenir estes, utilizando conceitos como álgebra linear e programação para manter padrões confiáveis, reproduutíveis e eficientes. A base dos métodos mais atuais da quimiometria é a PCA (do inglês, *Principal Component Analysis*), que utiliza uma manipulação de matriz constituída dos dados experimentais a fim de representar as variações entre eles num número reduzido de fatores. Os dados são distribuídos em três matrizes diferentes (*scores*, *loadings* e resíduo) formadas com base na similaridade destes dados, em seguida agrupados em duas componentes principais (PC1 e PC2), também com base na similaridade, para por fim construir um plano bidimensional em que se é possível analisar a dispersão dos dados.^{5,10}

A PLSDA (*partial least squares discriminant analysis*) é um outro modelo quimiométrico muito utilizado na classificação de amostras desconhecidas, baseado na redução da dimensão dos dados e construção de modelos de predição. É subdividido em PLS1-DA, que classifica amostras binárias, e PLS2-DA, que classifica amostras multivariadas como as abordadas por Braz e pesquisadores. Para a construção do modelo, amostras anômalas são descartadas para mitigar interferências; em seguida, o modelo é treinado calculando-se métricas de desempenho como taxas de falso positivo (FP), verdadeiros negativos (VN), falsos negativos (FN) e parâmetros de estatística (sensibilidade, especificidade, acurácia), por fim validando-se o modelo pela eficiência em sua classificação.^{5,11}

As amostras selecionadas por Braz e pesquisadores foram cédulas de 100 Reais, considerando que representam a maioria dentre as falsificações.^{5,6} Um total de 100 cédulas, 50 falsas e 50 verdadeiras, foram analisadas por infravermelho médio com ATR (ATR-FTIR) e infravermelho próximo (MicroNIR), sem preparo prévio além de manipulação cuidadosa para evitar interferências. As cédulas verdadeiras foram cedidas por uma instituição bancária de Vila Velha, no Espírito Santo, enquanto as falsificadas foram cedidas pela Polícia Civil do Espírito Santo, originadas de apreensões. Foram analisadas dez regiões (P) das amostras, cada uma em triplicata, em que 8 se referem às regiões adotadas pelo Banco Central do Brasil como elementos de segurança: P1 - faixa holográfica; P2 - elementos fluorescentes; P3 - quebra-cabeça; P4 - marca-d'água; P5 - alto relevo; P6 - fio de segurança; P7 - microimpressões e P8 - número oculto. Braz e colaboradores escolheram as outras duas regiões (9 e 10) por possuírem coloração intensa, como esquematizado pela Figura 1.^{5,6}

Figura 1. Marcação das 10 regiões analisadas nas cédulas de 100 Reais. Extraído da referência 5.



Para as análises, no infravermelho médio, Braz e pesquisadores utilizaram um espetrômetro FTIR Cary 630 equipado com ATR-FTIR com cristal de diamante, obtendo-se 16 *scans* por aquisição e 8 *scans* de *background* por amostra, com resolução de 4 cm⁻¹ na faixa espectral de 4000 a 650 cm⁻¹, modo absorbância. No infravermelho próximo, o espetrômetro utilizado foi o NIR Modelo Pro 1700, na faixa espectral de 908 a 1676 nm, performando 125 *scans* de amostra e 400 de varredura no modo absorbância.

O tratamento dos dados foi feito, inicialmente, utilizando o *software* Matlab versão R2024b para calcular os valores médios de cada triplicata. Em seguida, o *software* OriginPro 8.5 versão SR1 para produzir os gráficos dos espectros de cada região das cédulas, com o objetivo de identificar as bandas que poderiam determinar a autenticidade delas.

O modelo de PCA foi construído no *software* Orange Data Mining Tool (ODTM) versão 3.37.0, separando os dados em tabelas por regiões e identificando as classes como “autêntica” e “falsa”. O modelo foi construído com a seleção de 10 componentes e normalização das variáveis, deixando as 20 primeiras a mostra. Para serem colocados no modelo, os espectros foram submetidos a três pré-processamentos: Savitzky-Golay filter (janela 5 e ordem polinomial de 2); *baseline correction* do tipo linear com *background action* de substrato e normalização vetorial dos espectros. Já o modelo de PLSDA foi produzido com o *software* Matlab, dividindo os dados em um subconjunto de treinamento (60% das amostras) e um subconjunto de teste externo (40% das amostras), pelo método Kennard-Stone. Braz e colaboradores cruzaram os dados de treinamento pelo método *k-fold*, utilizando os

subconjuntos para seleção do número ótimo de variáveis latentes, minimizando a taxa de erro de classificação da validação cruzada. Avaliou-se o modelo utilizando parâmetros de sensibilidade, especificidade e exatidão, conforme as Equações 1 a 3:

$$\text{Sensibilidade} = \frac{VP}{VP + FN} \quad (1)$$

$$\text{Especificidade} = \frac{VN}{VN + FP} \quad (2)$$

$$\text{Exatidão} = \frac{VP + VN}{VP + VN + FP + FN} \quad (3)$$

em que VP é verdadeiro positivo; VN é verdadeiro negativo; FP é falso positivo e FN é falso negativo.⁵

Resultados e discussão

Os espectros obtidos foram comparados, relacionando-os por região analisada, a fim de encontrar disparidades padrões entre cédulas autênticas e falsificadas. Com o auxílio do MicroNIR, encontrou-se uma maior diferença nos espectros das regiões P1, P7 e P8, conforme a Figura 2. Braz e colaboradores atribuíram essa diferença à presença dos elementos de segurança, como a faixa holográfica e elementos fluorescentes em P1 e a calcografia nos pontos P7 e P8. Foram analisadas também as variâncias conforme o modelo quimiométrico PCA, utilizando-se gráficos de *scores*, obtendo-se uma variância acumulada (somatório de PC1 e PC2) de 78% para P1, 77% para P7 e 94% para P8. Observa-se, portanto, uma maior discrepância em P8 entre os pontos analisados, que também fica evidente no gráfico de separação das amostras por PC1 na Figura 3.⁵

Para atestar a eficácia do método em estudo, um modelo de PLSDA foi construído com objetivo de classificar a amostra em autêntica ou não, com base nos espectros de MicroNIR e a classe original de algumas amostras. Portanto, calculou-se a probabilidade das amostras analisadas pertencerem à classe autêntica, e a Figura 4 evidencia a separação entre autêntica, falsa, teste e treino. O método se mostra efetivo ao não possuir nenhum falso negativo ou falso positivo, a não ser na análise conjunta dos pontos em que se observa dois falsos positivos num total de mil pontos, ou seja, uma taxa de erro de apenas 0,2%.⁵

Figura 2. Espectros MicroNIR de cédulas autênticas (azuis) e falsas (vermelhas) de P1 a P10, após aplicação da primeira derivada. Extraído da referência 5.

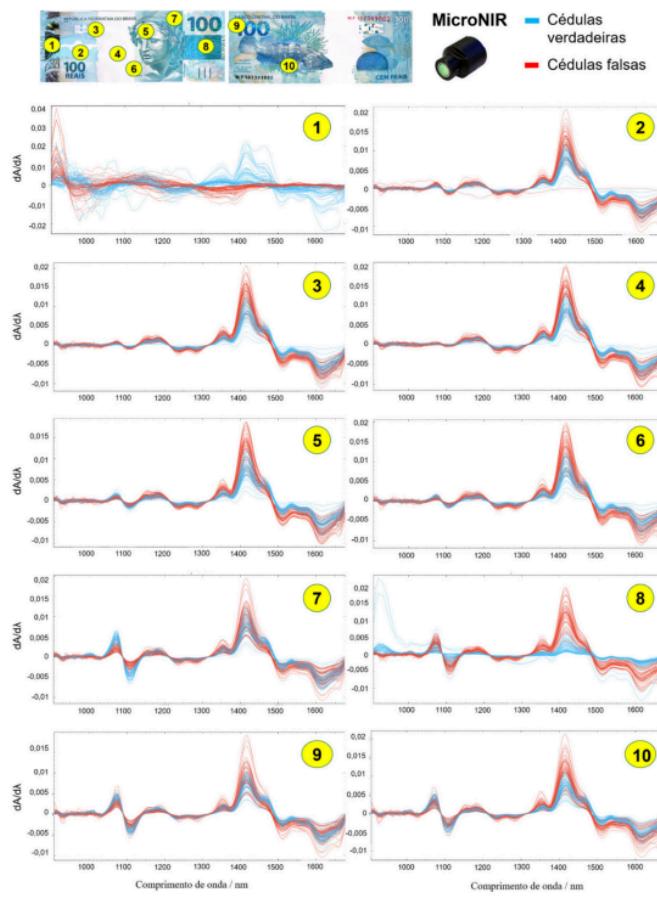


Figura 3. Gráficos de scores do modelo de PCA de P1 a P10 no MicroNIR. Extraído da referência 5.

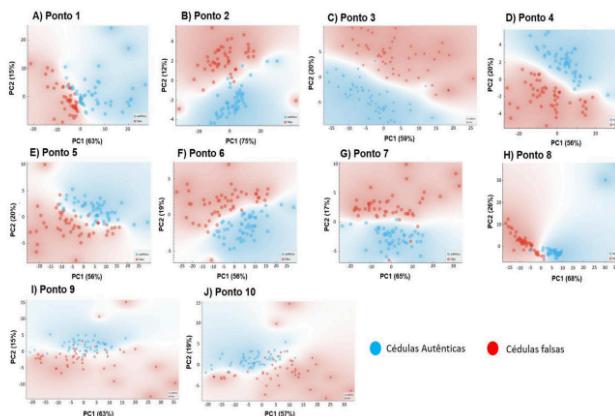
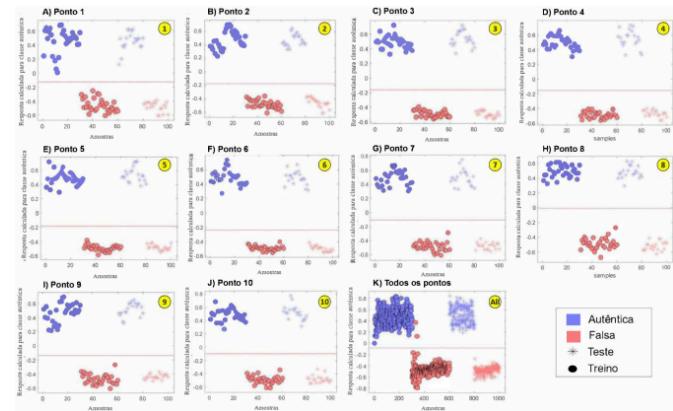


Figura 4. Resposta calculada para o modelo PLSDA das análises no MicroNIR para aprobabilidade das amostras serem autênticas. Extraído da referência 5.



Com a intenção de ter uma avaliação mais aprofundada, Braz e pesquisadores analisaram todos os espectros obtidos de forma conjunta, de acordo com parâmetros de sensibilidade, especificidade, precisão e exatidão do método; além das taxas de erro, acerto e amostras não atribuídas. O modelo de predição de amostras externas obteve todos os resultados iguais a 1,00, indicativo de 100% de eficácia, de acordo com a Tabela 1:⁵

Tabela 1. Resultado da validação do modelo PLSDA para o MicroNIR. Extraído da referência 5.

Modelo	Classe	Sens.	Espec.	Precisão
Treino	autêntica	1,00	0,99	0,99
	falsa	0,99	1,00	1,00
Validação cruzada	autêntica	1,00	0,99	0,99
	falsa	0,99	1,00	1,00
Predição de amostras ext.	autêntica	1,00	1,00	1,00
	falsa	1,00	1,00	1,00
Taxa de erro: 0,00	Taxa de acerto: 1,00	Exatidão: 1,00		
		Não atribuídas: 0,02		

Já na análise por ATR-FTIR, os pontos que apresentaram maior discrepância foram P7, P9 e P10, como observado na Figura 5. O modelo de PCA obteve, em sua somatória de PC1 e PC2, uma variância acumulada de 88% para P7, 83% para P9 e 84% para P10. Com isto, além da diferenciação visual, pode-se determinar a autenticidade das cédulas, conforme a Figura 6.⁵

Figura 5. Espectros ATR-FTIR de cédulas verdadeiras (azul) e falsas (vermelho) de P1 a P10. Extraído da referência 5.

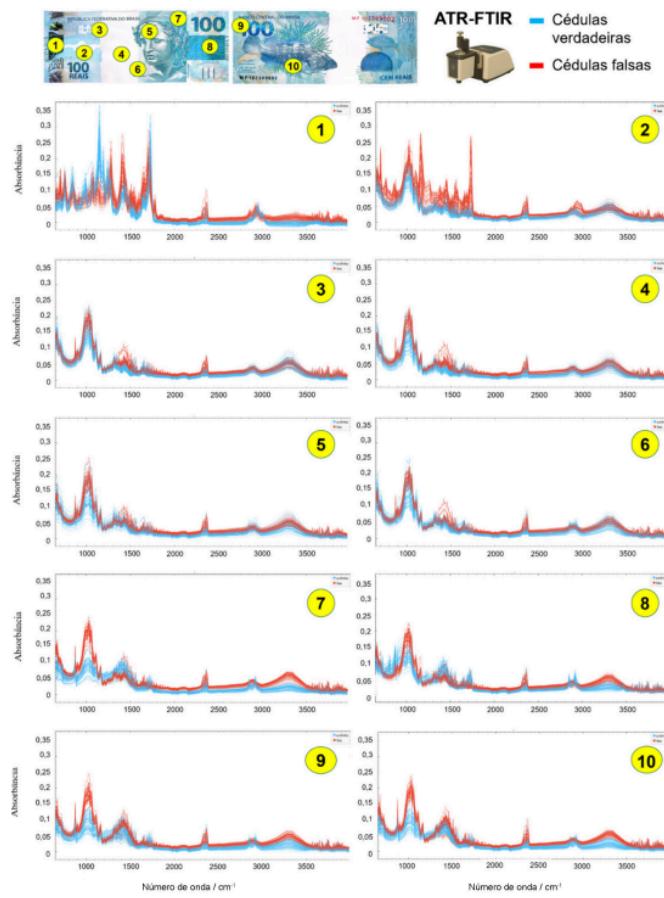
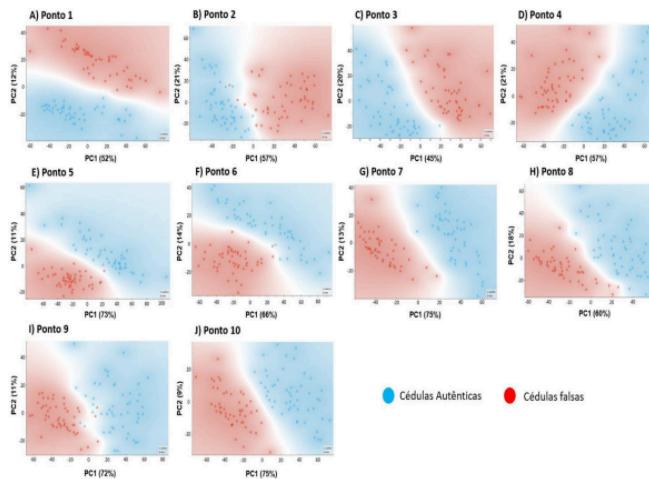


Figura 6. Gráficos de *scores* da PCA de P1 a P10 no ATR-FTIR. Extraído da referência 5.



Os dados obtidos no ATR-FTIR confirmam a influência dos elementos de segurança na diferenciação das células, pois as regiões de resultados mais expressivos são as regiões com calcografia nas células autênticas. Comparando MicroNIR com ATR-FTIR, observa-se que o fator da impressão do papel moeda em intaglio é um ponto crítico para a identificação de autenticidade, visto que as falsificações são

geralmente feitas em impressoras comuns por sistema CMYK (do inglês, *cyan*, *magenta*, *yellow*, *key*). O MicroNIR se mostrou eficiente em identificar variações relacionadas à celulose e aos pigmentos orgânicos, enquanto o ATR-FTIR evidencia com clareza as diferenças químicas presentes nos elementos de segurança.⁵

Um modelo PLSDA também foi construído para as análises em ATR-FTIR, testando-se o desempenho do modelo a partir dos mesmos parâmetros utilizados para o MicroNIR, conforme a Figura 7 e a Tabela 2:⁵

Figura 7. Resposta calculada para o modelo PLSDA das análises no ATR-FTIR. Extraído da referência 5.

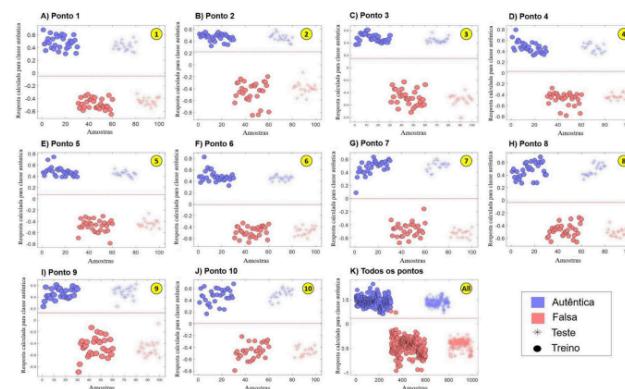


Tabela 2. Resultado da validação do modelo PLSDA para o ATR-FTIR. Extraído da referência 5.

Modelo	Classe	Sens.	Espec.	Precisão
Treino	autêntica	1,00	0,99	0,99
	falsa	0,99	1,00	1,00
Validação cruzada	autêntica	1,00	0,99	0,99
	falsa	0,99	1,00	1,00
Predição de amostras ext.	autêntica	1,00	1,00	1,00
	falsa	1,00	1,00	1,00

Taxa de erro: 0,00 Taxa de acerto: 1,00 Exatidão: 1,00
Não atribuídas: 0,02

Conclusões

Braz e colaboradores obtiveram resultados excelentes para demonstrar a eficácia das técnicas MicroNIR e ATR-FTIR na análise forense, com 100% de acurácia, sensibilidade e especificidade nos modelos de PLSDA para teste externo. A precisão estatística alinhada com o caráter não destrutivo e mínimo de preparo amostral do estudo se

mostram em perfeita sintonia com as necessidades da ciência forense. O MicroNIR traz a otimização por sua portabilidade, permitindo análise em campo e redução de custos, apesar de ser limitado em alguns pontos, visto que P1 e P8 foram mais discriminantes principalmente pelo modelo PCA. Já o ATR-FTIR, apesar de não ter o caráter portátil, permite uma análise mais aprofundada e específica que pode auxiliar no detalhamento da infração. Braz e pesquisadores inovaram ao associar métodos analíticos com quimiometria, assim trazendo um desempenho de 100% de acerto e demonstrando a robustez do método proposto, mesmo com baixo custo e utilização de material portátil. Assim, comprova-se a aplicabilidade prática do estudo na área de documentoscopia e suas delegações no combate à fraude fiscal em papel moeda.⁵

Contribuições por Autor

O artigo, a revisão de referências e a inclusão de algumas observações são de Anthony Monteiro.

Conflito de interesse

Não há conflito de interesses.

Agradecimentos

Ao Grupo PET-Química/IQ/UnB/MEC, à Secretaria de Educação Superior do Ministério da Educação e ao Decanato de Ensino de Graduação (DEG/UnB) pelo apoio. Ao Programa de Educação Tutorial pela bolsa concedida. Ao Instituto de Química da Universidade de Brasília (IQ/UnB) pelo suporte e espaço fornecidos.

Notas e referências

- 1 F. de Barros, B. Kuhnen, M. da C. Serra e C. M. da S. Fernandes, Ciências forenses: princípios éticos e vieses, *Rev. Bioét.*, 2021, **29**, 55–65.
- 2 V. Z. dos Santos, dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2024.
- 3 Técnicas e Importância da Perícia Documental, <https://www.jusbrasil.com.br/artigos/tecnicas-e-importancia-da-pericia-documental/2269755874>, (acessado em 7 de Janeiro, 2026).
- 4 F. E. D. S. Vasconcelos, *O Alferez*, 1988, **6**, 15–43.

- 5 A. C. F. Braz, J. M. O. B. Brandão, N. A. dos Santos, M. H. C. Nascimento, B. M. M. Siqueira, P. R. Filgueiras e W. Romão, ESTUDO DA AUTENTICIDADE DE CÉDULAS DE CEM REAIS POR ESPECTROSCOPIA NA REGIÃO DO INFRAVERMELHO MÉDIO E PRÓXIMO ASSOCIADA A MÉTODOS QUIMIOMÉTRICOS, *Quim. Nova*, 2025, **48**, 1–10.
- 6 Estatística de Falsificação, <https://www.bcb.gov.br/estatisticas/mecirestfalsas?ano=2025>, (acessado em 7 de Janeiro, 2026).
- 7 Segunda família do real, <https://www.bcb.gov.br/cedulasemoedas/segundafamilia>, (acessado em 7 de Janeiro, 2026).
- 8 T. A. de Oliveira, dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, 2020.
- 9 L. A. Colnago e T. de C. Bicudo, A Espectroscopia na região do Infravermelho e algumas aplicações, *Documentos*, 2010, **51**.
- 10 M. M. C. Ferreira, A. M. Antunes, M. S. Melgo and P. L. O. Volpe, Quimiometria I: calibração multivariada, um tutorial, *Quím. Nova*, 1999, **22**, 724–731.
- 11 L. C. Lee, C.-Y. Lioung e A. A. Jemain, Partial least squares-discriminant analysis (PLS-DA) for classification of high-dimensional (HD) data: a review of contemporary practice strategies and knowledge gaps, *Analyst*, 2018, **143**, 3526–3539.