

Padronização de Soluções de NaOH Utilizando Repolho Roxo e Imagens Digitais

Standardization of NaOH Solutions Using Red Cabbage Extract and Digital Images

Bruno F. Silva,^a Ray Araújo Costa Sousa,^a Rafael C. S. Azevedo,^a Pedro A. O. Morais^{a,*}

^a Universidade Federal do Maranhão, Centro de Ciências de Chapadinha, BR-222 Km 4, Boa Vista, CEP 65500-000, Chapadinha-MA, Brasil

*E-mail: morais.pedro@ufma.br

Submissão: 10 de Outubro de 2025 – Aceite: 5 de Março de 2026 – Publicado online: 13 de Março de 2026

The standardization of sodium hydroxide (NaOH) solutions by titration is widely used but can be labor-intensive, require relatively large reagent volumes, and rely on the analyst's visual perception, which may introduce experimental uncertainties. This study proposes an alternative methodology based on the use of red cabbage extract as a natural acid–base indicator combined with smartphone-based digital image analysis to determine NaOH concentration. Since the pH of NaOH solutions is directly related to their concentration, the chromatic response of the indicator was quantitatively correlated with this parameter. RGB color channel histograms extracted from the images were modeled using partial least squares (PLS) regression. The model exhibited excellent predictive performance, with a validation coefficient of determination ($R^2 = 0.981$), RMSEP of 0.71 mmol L^{-1} , and RPD of 8.79. Although a statistical difference was observed for one sample when applying an independent t-test, the results obtained by the proposed method were generally consistent with those from conventional titration and suitable for routine analytical applications. In addition, the approach reduced the required sample volume by approximately 80%, minimized waste generation, and employed a biodegradable indicator, providing a sustainable, accessible, and rapid alternative for NaOH solution standardization.

Keywords: Image analysis; titration; natural pH indicator; PLS; smartphone.

1. Introdução

A padronização é uma técnica amplamente utilizada em laboratórios químicos para assegurar a concentração de uma solução, sendo fundamental para a confiabilidade de análises quantitativas, preparo de reagentes, controle de qualidade e atividades de ensino experimental. Erros na concentração de soluções padrão podem propagar incertezas analíticas, comprometer resultados subsequentes e afetar a reprodutibilidade de procedimentos laboratoriais, especialmente em análises volumétricas e instrumentais. Nesse procedimento, emprega-se um padrão primário, isto é, uma espécie química de alta pureza e estabilidade, com peso molecular elevado e que reaja estequiometricamente com o analito.¹ A padronização da solução de hidróxido de sódio (NaOH), por exemplo, é necessária, pois essa base é higroscópica, o que pode comprometer a exatidão no preparo. Assim, após a preparação, a solução é titulada com uma substância padrão primário, como o biftalato de potássio ($\text{KHC}_8\text{H}_4\text{O}_4$), que reage com o NaOH em proporção estequiométrica 1:1.² A fenolftaleína em solução é comumente utilizada como indicador sintético nesse

processo, apresentando coloração rosa em meio básico ($\text{pH} > 8,3$) e incolor em meio ácido.³

A titulação ácido-base apresenta vantagens bem estabelecidas, como simplicidade conceitual, ampla aceitação normativa e boa precisão quando conduzida sob condições controladas. No entanto, em rotinas laboratoriais que envolvem um número elevado de amostras, esse procedimento pode tornar-se laborioso, demandar volumes relativamente elevados de reagentes e depender da percepção visual do analista na identificação do ponto final.^{4,5} Esses fatores podem introduzir incertezas experimentais e resultar em maior geração de resíduos químicos. Apesar de amplamente consolidada, a literatura ainda carece de metodologias alternativas que reduzam o consumo de reagentes, minimizem resíduos e mantenham desempenho analítico adequado para a padronização de soluções básicas.

Nesse contexto, o desenvolvimento de métodos alinhados aos princípios da Química Analítica Verde tem sido amplamente incentivado, priorizando a prevenção da geração de resíduos, o uso de reagentes menos tóxicos, a simplificação de etapas experimentais e a redução do consumo de recursos. Uma abordagem promissora

consiste na utilização de indicadores naturais associados à análise de imagens digitais. O extrato de repolho roxo (*Brassica oleracea*), por exemplo, contém antocianinas que atuam como indicadores ácido-base.^{6,7} Conforme o pH da solução, o extrato apresenta diferentes cores: vermelho em meio ácido, verde em meio básico e amarelo em condições fortemente básicas.⁸ Embora frequentemente empregados em avaliações qualitativas de pH, os indicadores naturais também podem ser utilizados em determinações quantitativas. Cannon e Ong (2013)⁹ quantificaram o pH por meio de espectrofotometria utilizando extrato de repolho roxo. De forma semelhante, Barboza *et al.* (2022)¹⁰ determinaram o pH de soluções aquosas a partir de imagens digitais, sem recorrer ao pHmetro. Entretanto, esses estudos concentram-se majoritariamente na determinação do pH, não explorando a aplicação direta desses sistemas para a padronização de soluções alcalinas, como o NaOH, sem recorrer ao procedimento clássico de titulação, a partir do uso de imagens digitais e ferramentas quimiométricas.

Paralelamente, a análise de imagens digitais tem sido amplamente explorada em diferentes áreas da química analítica, evidenciando sua versatilidade e confiabilidade.^{11,12} Essa abordagem tem sido aplicada em variados contextos, como análise de água,^{13,14} solo,^{15–17} bebidas,^{18–23} alimentos,^{24–30} medicamentos^{31,32} e aplicações forenses.^{33,34} Neste sentido, a combinação entre indicadores naturais e análise de imagens digitais desponta como uma abordagem promissora para o desenvolvimento de metodologias analíticas alternativas aos procedimentos convencionais.

Dessa forma, o objetivo deste estudo é determinar a concentração de soluções de NaOH utilizando extrato de repolho roxo, a partir de informações obtidas por meio de imagens digitais adquiridas com smartphone. A proposta não tem como finalidade substituir o procedimento clássico de titulação ácido-base em aplicações normativas, mas visa desenvolver uma metodologia alternativa, de baixo custo, alinhada aos princípios da Química Analítica Verde, como a redução do volume de amostras e, consequentemente, do passivo ambiental, bem como o uso de reagentes biodegradáveis, com potencial aplicação em laboratórios de ensino, análises de rotina e contextos que demandem maior produtividade analítica. Os resultados obtidos serão comparados com os da padronização tradicional, utilizando fenolftaleína como indicador sintético.

2. Experimental

2.1. Preparo das soluções

Foram preparadas duas soluções de NaOH (> 98%, Dinâmica, Indaiatuba, Brasil) com concentração de 2,0 e 6,2 mmol L⁻¹ utilizando água destilada.

2.1.1. Padronização das soluções de NaOH por titulação

O biftalato de potássio (> 99,5%, Isotar, Duque de Caxias, Brasil) foi seco em estufa a 110 °C por duas horas e resfriado em dessecador. Em seguida, foi preparada uma solução de 25 mmol L⁻¹ em água destilada. As soluções de NaOH foram padronizadas, em triplicata, por titulação com o biftalato recém-preparado, empregando fenolftaleína (99,4%, Neon, São Paulo, Brasil) a 1% (m/v) como indicador.³⁵ Em cada repetição, utilizou-se 25 mL da solução de NaOH.

2.2. Metodologia baseada em imagens digitais

2.2.1. Preparo do extrato de repolho roxo

O repolho roxo (*Brassica oleracea*) foi adquirido em um supermercado localizado em Chapadinha, Maranhão, Brasil. Após fatiamento com faca de mesa, 25 g foram pesados em balança analítica (AUY220, Shimadzu, Quioto, Japão) e adicionados a 100 mL de água destilada. A mistura foi aquecida até fervura e, após resfriamento, filtrada em papel de filtro quantitativo (J. Prolab, São José dos Pinhais, Brasil), faixa branca, de tamanho de poro 25 µm. O extrato obtido foi armazenado sob refrigeração e utilizado por até duas semanas, sem alterações visuais significativas de coloração. Após esse período, a solução tornava-se turva, inviabilizando a obtenção das imagens. Eventuais variações decorrentes de um novo preparo do extrato não limitam a aplicação do método, uma vez que a abordagem adotada é baseada em calibração. Assim, a construção de uma nova curva analítica com o extrato recém-preparado incorpora naturalmente essas variações, que passam a estar presentes tanto nas soluções de calibração quanto nas amostras analisadas.

2.2.2. Preparo da curva analítica

Onze soluções de NaOH, com concentração entre 0,0 a 20,6 mmol L⁻¹, foram preparadas por diluição de uma solução de NaOH previamente padronizada, com concentração de 25,0 mmol L⁻¹. Para cada concentração, 5 mL de cada solução foi transferido para um tubo de vidro de 15 mm de diâmetro, seguido da adição de 2 mL de extrato de repolho roxo. Por último, cada solução foi homogeneizada de forma manual. O procedimento foi repetido em triplicata, totalizando 33 soluções.

2.2.3. Preparo das amostras de NaOH

As soluções de NaOH com concentração de 2,0 e 6,2 mmol L⁻¹, previamente padronizadas por titulação, foram transferidas (5 mL) para tubos de vidro de 15 mm de diâmetro. Em seguida, adicionaram-se 2 mL de extrato de repolho roxo e realizou-se agitação manual. Todas as

amostras foram preparadas em triplicata, totalizando seis soluções.

2.2.4. Aquisição das imagens digitais das soluções de NaOH

Após a adição do extrato de repolho roxo nos tubos contendo as soluções da curva analítica e as amostras, realizou-se a aquisição das imagens digitais utilizando smartphone (S23 Ultra, Samsung, Seul, Coreia do Sul). Cada solução foi posicionada em uma estante para tubos de ensaio. As imagens foram obtidas a 5 cm de cada tubo em formato .JPEG (Joint Photographic Experts Group), no modelo RGB, com resolução de 12 megapixels (3000 x 4000 pixels). As imagens foram obtidas em triplicata, totalizando 117 imagens (99 referentes à curva analítica e 18 às amostras). Para padronizar as condições experimentais, todas as imagens foram adquiridas no mesmo local, mantendo-se constantes a iluminação, o fundo e a perspectiva, com a opção de autofoco do smartphone desabilitada. Todas as imagens coletadas para este trabalho podem ser solicitadas via e-mail ao autor correspondente. As imagens das soluções de NaOH na presença de extrato de repolho roxo utilizadas neste estudo foram apresentadas nas Informações Suplementares.

2.3. Processamento das imagens

As imagens digitais foram abertas e processadas utilizando a linguagem de programação Python (versão 3.11),³⁶ por meio do pacote OpenCV.³⁷ Para cada imagem, realizou-se o recorte digital de uma região de interesse (ROI) de 300×200 pixels, contendo exclusivamente a solução (Figura 1). O recorte foi executado de forma padronizada, empregando as mesmas coordenadas para todas as imagens, garantindo reprodutibilidade e eliminando interferências associadas à seleção manual. Não foi aplicado nenhum pré-processamento adicional às imagens, como filtragem, correção de brilho ou contraste.

A partir das imagens recortadas, foram extraídos os histogramas de ocorrência dos canais vermelho (R), verde (G) e azul (B) utilizando a função *calcHist* do OpenCV. Cada histograma foi composto por 256 variáveis correspondentes às intensidades de *pixel* (0–255) de cada canal. Os histogramas foram concatenados, resultando em uma matriz 117×768 , onde cada linha corresponde a uma solução e cada coluna a uma intensidade de cor. Para cada solução, calculou-se o histograma médio a partir das três replicatas, obtendo-se uma matriz final de 13×768 , composta por 11 linhas referentes às soluções da curva analítica e 2 linhas correspondentes às amostras. A visualização dos histogramas médios dos canais RGB e das distribuições de intensidade foi realizada utilizando o pacote Matplotlib.³⁸



Figura 1. Regiões recortadas das soluções da curva analítica e das amostras

2.4. Análise dos dados

A matriz com os dados das imagens (13×768) foi organizada e analisada em ambiente Python, com apoio dos pacotes Scikit-learn³⁹ e NumPy.⁴⁰ Essa matriz foi subdividida em três conjuntos: i) calibração, composta por oito soluções da curva analítica (0,0; 2,1; 6,2; 8,3; 12,3; 14,4; 18,5; 20,6 mmol L⁻¹); ii) validação, formada por três soluções intermediárias da curva analítica (4,1; 10,4; 16,5 mmol L⁻¹); e iii) teste, contendo as duas amostras analisadas. A divisão dos conjuntos de dados em calibração,

validação e teste foi realizada de forma intencional, visando garantir uma distribuição representativa das concentrações ao longo de toda a faixa estudada. O conjunto de calibração foi composto por oito soluções distribuídas ao longo da curva analítica, enquanto o conjunto de validação incluiu três concentrações intermediárias, não utilizadas na calibração. As duas amostras analisadas foram mantidas exclusivamente no conjunto de teste, de modo a avaliar a capacidade preditiva do modelo em dados desconhecidos.

Em seguida, o método dos mínimos quadrados parciais (PLS - *Partial Least Square*)⁴¹ foi utilizado para correlacionar os dados das imagens com as concentrações de NaOH. O extrato de repolho roxo apresenta uma resposta cromática complexa em função do pH, com transições graduais entre diferentes tonalidades, como vermelho, roxo, azul, verde e amarelo,⁹ resultando em variações simultâneas e correlacionadas nos canais R, G e B. Assim, a modelagem multivariada foi empregada para explorar de forma conjunta essas informações. O método PLS promove a decomposição simultânea tanto das variáveis independentes, matriz de dados das imagens, quanto da variável dependente, a concentração de NaOH, em variáveis latentes (LVs) de modo a maximizar a relação entre os dois. Previamente à calibração, os dados foram centrados na média.

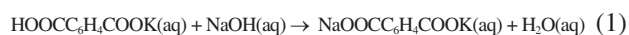
O número ótimo de variáveis latentes (LVs) foi determinado por meio da validação cruzada *leave-one-out*. Nesse procedimento, constrói-se um modelo PLS utilizando todas as amostras do conjunto de calibração, exceto uma. Em seguida, esse modelo é utilizado para prever a concentração de NaOH da amostra deixada de fora. Esse processo é repetido sucessivamente até que todas as amostras tenham sido excluídas uma vez. Para cada número de variáveis latentes (LVs), calcula-se o erro quadrático médio da validação cruzada (RMSECV – Root Mean Square Error of Cross Validation). O número ideal de LVs foi determinado com base no menor valor de RMSECV que não apresentasse diferença significativa em relação a modelos mais simples. Essa abordagem visa evitar o sobreajuste do modelo e garantir melhor capacidade de generalização, assegurando que o desempenho preditivo observado seja decorrente de relações reais entre os dados espectrais extraídos

das imagens e a concentração de NaOH. Os gráficos de validação cruzada (RMSECV em função do número de LVs) e de correlação entre valores previstos e experimentais foram gerados utilizando o pacote Matplotlib.

O desempenho do modelo PLS foi avaliado conforme os parâmetros estatísticos: RMSEC (Root Mean Square Error of Calibration - Raiz quadrada do erro médio quadrático de calibração), RMSEP (Root Mean Square Error of Prediction - raiz quadrada do erro médio quadrático de predição) e o desvio de predição residual (RPD - *Residual Prediction Deviation*).^{42,43} Além disso, as concentrações obtidas pelo método proposto foram comparadas às da titulação convencional por meio do teste t para duas amostras independentes, com correção de Welch (nível de confiança de 95%). Essa abordagem foi adotada para avaliar possíveis diferenças entre os métodos analíticos, sem pressupor igualdade de variâncias, sendo mais adequada para conjuntos de dados com tamanho amostral reduzido.

3. Resultados e Discussão

A padronização de soluções de hidróxido de sódio (NaOH) é geralmente realizada por titulação com biftalato de potássio, conforme a reação:



No presente estudo, as soluções foram inicialmente padronizadas por titulação convencional para fins de comparação com a metodologia proposta. O pH de soluções de NaOH, por ser uma base forte, depende diretamente da sua concentração. Assim, indicadores naturais como o extrato de repolho roxo podem ser explorados como alternativa à titulação convencional. Em meio alcalino, este extrato apresenta mudanças de coloração: azul em pH 7–8, verde em pH 9–11, e amarelo em pH acima de 12.⁴⁴

A resposta cromática do extrato de repolho roxo em função da concentração de NaOH foi avaliada por meio da extração de histogramas de intensidade dos canais vermelho (R), verde (G) e azul (B). A Figura 2 apresenta os histogramas médios de intensidade dos canais RGB

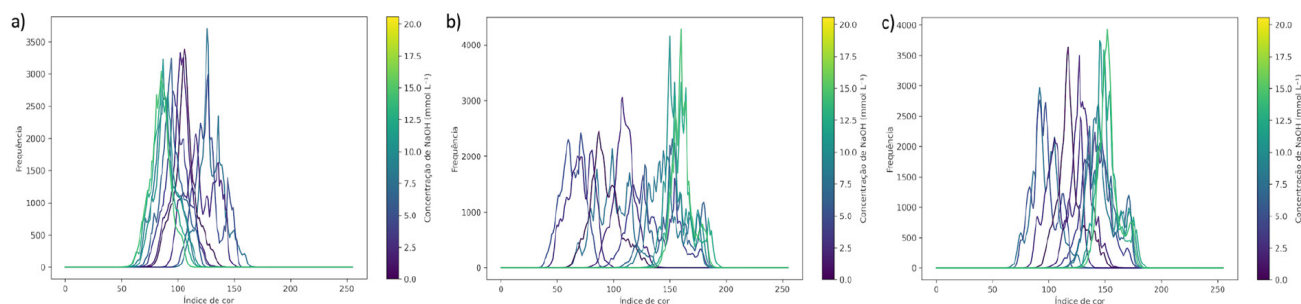


Figura 2. Histogramas médios de intensidade dos canais: (a) vermelho (R); (b) verde (G) e (c) azul (B), obtidos a partir das imagens digitais das soluções da curva analítica de NaOH

para todas as soluções da curva analítica. Observa-se que o aumento da concentração de NaOH promove redistribuições graduais das intensidades de *pixel* ao longo de toda a faixa dinâmica dos histogramas, com comportamentos distintos em cada canal de cor e sobreposição parcial entre diferentes concentrações.

A análise univariada dos canais RGB mostrou correlações elevadas entre a intensidade média de cada canal e a concentração de NaOH. Observou-se correlação negativa para o canal vermelho ($r = -0,963$) e correlações positivas para os canais verde ($r = 0,958$) e azul ($r = 0,915$), todas estatisticamente significativas ($p < 0,01$). Esses resultados indicam que, embora canais individuais apresentem forte relação com a concentração da base, as variações cromáticas ocorrem de forma simultânea e complementar entre os diferentes canais, reforçando a natureza multivariada da resposta do extrato de repolho roxo e justificando a aplicação da regressão por PLS.

O modelo PLS foi construído com oito soluções da curva analítica e validado com três concentrações intermediárias (4,1; 10,4; 16,5 mmol L⁻¹). O número ótimo de variáveis latentes (LVs) foi definido por validação cruzada *leave-one-out*. A Figura 3 apresenta a variação do RMSECV em função do número de LVs.

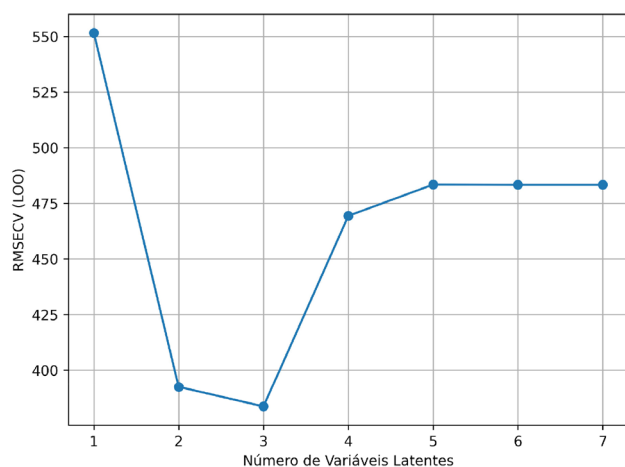


Figura 3. Variação do erro quadrático médio da validação cruzada (RMSECV) em função do número de variáveis latentes (LVs) do modelo PLS, obtida por validação cruzada *leave-one-out*

Segundo a Figura 3, a escolha de três LVs representa o melhor compromisso entre desempenho preditivo e simplicidade do modelo, uma vez que a inclusão de LVs adicionais resulta em aumento do RMSECV, caracterizando sobreajuste.

A Figura 4 apresenta a correlação entre os valores previstos e experimentais de concentração de NaOH.

Conforme a Figura 4, observa-se uma forte correlação entre os valores de concentração de NaOH previstos pelo modelo PLS e os valores experimentais. Para o conjunto

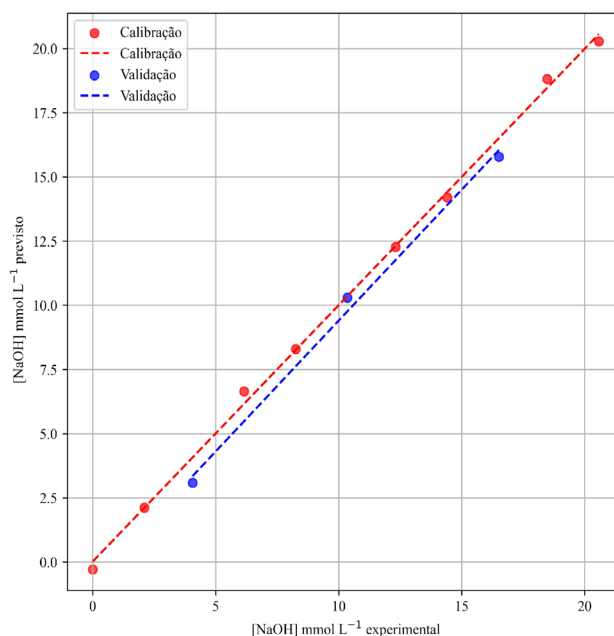


Figura 4. Correlação entre as concentrações de NaOH previstas pelo modelo PLS e os valores experimentais

de calibração, o modelo apresentou coeficiente de determinação (R^2) de 0,9985 e erro quadrático médio de calibração (RMSEC) de 0,27 mmol L⁻¹. Para o conjunto de validação, composto por três soluções não utilizadas na calibração, o erro quadrático médio de predição (RMSEP) foi de 0,71 mmol L⁻¹, com coeficiente de determinação (R^2) de 0,9806. O valor de RPD obtido para a validação foi de 8,79.

Os elevados valores de R^2 , aliados aos baixos valores de RMSEC e RMSEP e ao elevado RPD, indicam excelente capacidade de ajuste e predição do modelo.⁴⁵ Estudos anteriores mostraram o potencial do repolho roxo tanto em determinações qualitativas quanto quantitativas. Cannon e Ong (2013)⁹ empregaram espectrofotometria de absorção molecular em três comprimentos de onda (400, 520 e 600 nm) e obtiveram boas predições do pH na faixa entre 6,5 a 9,0. Combinando imagens digitais e aprendizado de máquina, Hastuti *et al.* (2020)⁴⁶ estimaram o pH entre 2 e 11 com RMSEP de 0,11 e $R^2 = 0,99$. Também utilizando imagens, Barboza *et al.* (2022)¹⁰ aplicaram o método PLS com extrato de repolho roxo, obtendo RMSEP de 0,98 e $R^2 = 0,97$. Diferentemente desses estudos, que têm como foco a determinação do pH, o presente trabalho explora a resposta cromática do extrato de repolho roxo como ferramenta quantitativa para a padronização de soluções de NaOH, dispensando o procedimento clássico da titulação. A concentração da base foi diretamente correlacionada aos histogramas RGB extraídos das imagens, utilizando modelagem multivariada.

Após a validação, o modelo PLS foi aplicado ao conjunto de teste, constituído por duas amostras de NaOH preparadas

em triplicata. As concentrações obtidas pelo método baseado em imagens digitais foram então comparadas com aquelas determinadas pela titulação convencional, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1. Concentrações de NaOH (mmol L^{-1}) obtidas pelo método baseado em imagens digitais e pela titulação convencional.

Amostra	Imagens digitais (mmol L^{-1})	Titulação (mmol L^{-1})
1	$2,5 \pm 0,41$	$2,0 \pm 0,00$
2	$7,8 \pm 0,55$	$6,2 \pm 0,29$

Os resultados apresentados na Tabela 1 evidenciam boa concordância geral entre as concentrações de NaOH obtidas pelo método baseado em imagens digitais e pela titulação convencional. A comparação estatística entre os métodos, realizada por meio do teste t para duas amostras independentes com correção de Welch (95% de confiança), indicou ausência de diferença estatisticamente significativa para a Amostra 1, enquanto, para a Amostra 2, foi observada diferença estatística entre os métodos. Ainda assim, os valores obtidos permanecem da mesma ordem de grandeza e são compatíveis com análises de rotina, não comprometendo a aplicabilidade prática da metodologia proposta. Os desvios padrão relativamente baixos observados para as triplicatas indicam boa consistência dos resultados e sugerem adequada repetibilidade do método, mesmo considerando a utilização de um indicador natural e a aquisição das imagens por smartphone. Do ponto de vista prático, a metodologia proposta se apresenta como uma alternativa quantitativa confiável à titulação convencional, com potencial de aplicação complementar em contextos que demandem maior simplicidade operacional, menor consumo de reagentes e maior rapidez analítica.

Além do desempenho analítico, o método proposto apresenta ganhos ambientais e operacionais quantitativamente relevantes em relação à titulação convencional. Enquanto o procedimento clássico requer volumes de aproximadamente 25 mL de amostra por repetição, a metodologia baseada em imagens digitais utiliza apenas 5 mL, o que corresponde a uma redução de cerca de 80% no volume de solução empregada e, conseqüentemente, na geração de resíduos. Adicionalmente, a substituição da fenolftaleína por um indicador natural, biodegradável e de baixo custo contribui para a redução do uso de reagentes sintéticos potencialmente nocivos. Esses aspectos estão diretamente alinhados a princípios fundamentais da Química Analítica Verde, como a prevenção da geração de resíduos, o uso de reagentes mais seguros e a simplificação de procedimentos analíticos. Dessa forma, a metodologia proposta mantém desempenho analítico comparável ao método de referência, ao mesmo tempo em que promove uma abordagem mais sustentável e eficiente para a padronização de soluções de NaOH.

Do ponto de vista didático, o experimento integra conceitos fundamentais de Química Analítica, como padronização de soluções e indicadores ácido-base, com ferramentas contemporâneas de tratamento de dados, incluindo análise de imagens digitais, extração de histogramas de cor e modelagem multivariada. O uso de softwares livres e acessíveis, como a linguagem Python e seus pacotes, favorece a formação dos estudantes em competências computacionais aplicadas à química, tornando a metodologia especialmente atrativa para aulas práticas de graduação, disciplinas experimentais e ações de extensão.

4. Conclusão

Neste trabalho, foi desenvolvida e avaliada uma metodologia alternativa para a padronização de soluções de hidróxido de sódio, baseada na integração entre o uso de um indicador ácido-base natural (extrato de repolho roxo) e a análise quantitativa de imagens digitais. A abordagem proposta explora a resposta cromática do extrato em função da concentração da base, correlacionando informações multivariadas extraídas das imagens com a concentração de NaOH por meio de modelagem quimiométrica. Os resultados obtidos indicaram boa concordância geral entre as concentrações determinadas pelo método baseado em imagens digitais e pela titulação convencional. Embora diferenças estatísticas pontuais tenham sido observadas para uma das amostras quando aplicado o teste t para amostras independentes, os valores permaneceram da mesma ordem de grandeza e compatíveis com análises de rotina, não comprometendo a aplicabilidade prática da metodologia proposta. Adicionalmente, o método permitiu uma redução de aproximadamente 80% no volume de amostra utilizado, com conseqüente diminuição da geração de resíduos, ao mesmo tempo em que substitui um indicador sintético por um indicador natural, biodegradável e de baixo custo.

A metodologia apresentada amplia o uso de indicadores naturais ao demonstrar que a resposta cromática do extrato de repolho roxo pode ser explorada de forma quantitativa quando associada à análise de imagens digitais e à modelagem multivariada. Dessa forma, o procedimento deixa de se restringir a avaliações qualitativas ou semiquantitativas de pH e passa a permitir a determinação da concentração de NaOH com desempenho analítico consistente e compatível com o método de referência. Do ponto de vista aplicado, o método se apresenta como uma alternativa complementar à titulação convencional, particularmente adequada a contextos que demandem maior rapidez analítica, menor consumo de reagentes, redução da geração de resíduos ou limitações de infraestrutura instrumental. Além disso, a integração entre conceitos de Química Analítica, aquisição de imagens e tratamento computacional de dados torna

a proposta especialmente atrativa para aplicações em atividades experimentais de ensino, laboratórios didáticos e análises de rotina.

Informações Suplementares

Informações Suplementares (imagens digitais das soluções de NaOH na presença de extrato de repolho roxo utilizadas neste estudo) estão disponíveis gratuitamente em <https://rvq.sbq.org.br/pdf/AR2026-5101-MS>.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico - MA (FAPEMA) pelo apoio financeiro e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão de bolsa de iniciação científica e a CAPES (Código de financiamento 001).

Referências Bibliográficas

1. Skoog, D. A.; West, D. M.; Holler, F. J.; Crouch, S. R.; *Fundamentos De Química Analítica*, 9a. ed., Cengage Learning: São Paulo, 2015.
2. Mendham, J.; Denney, R. C.; Barnes, J. D.; Thomas, K. J. M.; *Vogel: Análise Química Quantitativa*, 6a. ed., LTC: Rio de Janeiro, 2002.
3. Harris, D. C.; *Análise Química Quantitativa*, 5a. ed., TLC: Rio de Janeiro, 2005.
4. Forigua, D. A. A.; Meija, J.; Solution to titration endpoint challenge. *Analytical and Bioanalytical Chemistry* **2019**, 411, 3705. [Crossref]
5. Bacan, N.; Andrade, J. C.; Godinho, O. E. S.; Barone, J. S.; *Química Analítica Quantitativa Elementar*, 3a. ed., Blucher: São Paulo, 2001.
6. Brouillard, R.; Em *Anthocyanins as Food Colors*; Markakis, P.; eds.; Academic Press: Nova York, 1982, cap. 1.
7. Mazza, G.; Miniati, E.; *Anthocyanins in fruits, vegetables, and grains*. CRC Press: Londres, 1993.
8. He, J.; Giusti, M. M.; Anthocyanins: Natural Colorants with Health-Promoting Properties. *Annual Review of Food Science and Technology* **2010**, 1, 163. [Crossref]
9. Cannon, M. B.; Ong, K. L.; Em *Using Food To Stimulate Interest in the Chemistry Classroom*. ACS Symposium Series, 2013, cap. 10.
10. Barboza, R.; Vale, D.; Gomes, T.; Mesquita, T.; Silva, C.; Camargo, G.; Interdisciplinary education through the development of a cost-effective photometric pH meter sensor using natural pigments. *Química Nova* **2022**, 45, 750. [Crossref]
11. Rezazadeh, M.; Seidi, S.; Lid, M.; Pedersen-Bjergaard, S.; Yamini, Y.; The modern role of smartphones in analytical chemistry. *TrAC Trends in Analytical Chemistry* **2019**, 118, 548. [Crossref]
12. Soares, S.; Fernandes, G. M.; Rocha, F. R. P.; Smartphone-based digital images in analytical chemistry: Why, when, and how to use. *TrAC Trends in Analytical Chemistry* **2023**, 168, 117284. [Crossref]
13. Damasceno, D.; Toledo, T. G.; Godinho, M. S.; da Silva, C. P.; de Oliveira, S. B.; de Oliveira, A. E.; Análise multivariada de imagens na química: um experimento para determinação do pH de águas potáveis. *Química Nova* **2015**, 38, 836. [Crossref]
14. Maia, M. V.; Suarez, W. T.; Santos, V. B.; Oliveira, S. C. B.; Almeida, J. P. B.; A novel approach to Hg²⁺ determination in water samples using carbon dots based on paper and fluorescence digital image analysis. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology* **2024**, 99, 1157. [Crossref]
15. Souza, V. S.; Silva, S. M. S.; Maia, L. C.; Monteiro, D. S.; Souza, A. L. V.; Development of a methodology for phosphorus determination in soils, water, and biofertilizer using digital image analysis - DIA. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems* **2023**, 240, 104929. [Crossref]
16. Morais, P. A. O.; Souza, D. M.; Madari, B. E.; Oliveira, A. E.; Predicting silicon, aluminum, and iron oxides contents in soil using computer vision and infrared. *Microchemical Journal* **2021**, 170, 106669. [Crossref]
17. Morais, P. A. O.; Souza, D. M.; Madari, B. E.; Oliveira, A. E.; A computer-assisted soil texture analysis using digitally scanned images. *Computers and Electronics in Agriculture* **2020**, 174, 105435. [Crossref]
18. Marinho, O. R.; Lima, M. J. A.; Rocha, F. R. P.; Reis, B. F.; Kamogawa, M. Y.; A greener, fast, and cost-effective smartphone-based digital image procedure for quantification of ethanol in distilled beverages. *Microchemical Journal* **2019**, 147, 437. [Crossref]
19. Vyviurska, O.; Khvalbota, L.; Koljančić, N.; Španík, I.; Gomes, A. A.; Wine age prediction using digital images and multivariate calibration. *Microchemical Journal* **2023**, 190, 108738. [Crossref]
20. Franco, M. O. K.; Cardoso, W. J.; Vilanculo, C. B.; Santos, V. B.; Almeida, J. P. B.; Capitán-Vallvey, L. F.; Suarez, W. T.; Using a biphasic system and digital imaging analysis with chemometric tools for simultaneous determination of Cu²⁺ and furfural in cachaça. *Analytical Methods* **2023**, 15, 2300. [Crossref]
21. Törres, A. R.; Lyra, W. S.; Andrade, S. I. E.; Andrade, R. A. N.; Silva, E. C.; Araújo, M. C. U.; Nóbrega Gaião, E.; A digital image-based method for determining of total acidity in red wines using acid-base titration without indicator. *Talanta* **2011**, 84, 601. [Crossref]
22. Fernandes, J. S.; Fernandes, D. D. de S.; Pistonesi, M. F.; Diniz, P. H. G. D.; Tea authentication and determination of chemical constituents using digital image-based fingerprint signatures and chemometrics. *Food Chemistry* **2023**, 421, 136164. [Crossref]

23. Franco, M. O. K.; Suarez, W. T.; Pereira, G. R. P.; Vilanculo, C. B.; Vieira, M. C. R.; Santos, V. B.; Almeida, J. P. B.; Using colorimetric spot test and digital imaging-based technique for volatile acidity determination in cachaça with the aid of a smartphone. *Microchemical Journal* **2023**, *187*, 108416. [Crossref]
24. Zangirolami, M. S.; Santos, O. O.; O Uso de uma Câmera de Celular como uma Ferramenta Analítica Rápida, Barata e Não Destrutiva para Quantificar o Teor de Sólidos Solúveis no Catchup. *Revista Virtual de Química* **2025**, *17*, 483. [Crossref]
25. Jesus, J. G.; Reis, M. L. C. M.; Dantas, A. F.; Teixeira, L. S. G.; Dias, F. S.; Multivariate Optimization of an Analytical Method for Bisulfite Determination in Vinegar Samples Using Digital Images. *Food Analytical Methods* **2024**, *17*, 1327. [Crossref]
26. Hosseini, S. F.; Heidari, T.; Zendegi-Shiraz, A.; Ameri, M.; Application of chemometrics based on digital image analysis for simultaneous determination of tartrazine and sunset yellow in food samples. *Food Chemistry* **2025**, *470*, 142619. [Crossref]
27. Guerrero, M. D. C. L.; Martins, L. G. B.; Acorone, C.; Rigobello, E. S.; Valderrama, P.; Torres, Y. R.; Análise Multivariada de Imagem Digital e Espectro UV de Méis de Abelhas Nativas para Estimar Teores Totais de Fenólicos e Flavonoides. *Revista Virtual de Química* **2024**, *16*, 720. [Crossref]
28. Cho, B. H.; Koseki, S.; Determination of banana quality indices during the ripening process at different temperatures using smartphone images and an artificial neural network. *Scientia Horticulturae* **2021**, *288*, 110382. [Crossref]
29. Reile, C. G.; Rodríguez, M. S.; Fernandes, D. D. S.; Gomes, A. A.; Diniz, P. H. G. D.; Di Anibal, C. V.; Qualitative and quantitative analysis based on digital images to determine the adulteration of ketchup samples with Sudan I dye. *Food Chemistry* **2020**, *328*, 127101. [Crossref]
30. Fernandes, D. D. S.; Romeo, F.; Krepper, G.; Nezio, M. S. Di; Pistonesi, M. F.; Centurión, M. E.; Araújo, M. C. U.; Diniz, P. H. G. D.; Quantification and identification of adulteration in the fat content of chicken hamburgers using digital images and chemometric tools. *LWT* **2019**, *100*, 20. [Crossref]
31. Jain, R.; Jha, R. R.; Kumari, A.; Khatri, I.; Dispersive liquid-liquid microextraction combined with digital image colorimetry for paracetamol analysis. *Microchemical Journal* **2021**, *162*, 105870. [Crossref]
32. Jain, B.; Jain, R.; Jha, R. R.; Bajaj, A.; Sharma, S.; A green analytical approach based on smartphone digital image colorimetry for aspirin and salicylic acid analysis. *Green Analytical Chemistry* **2022**, *3*, 100033. [Crossref]
33. Souza, D. M.; Messias, P. J. M.; Santos, I. S.; Ramalho, E. D.; Ferrari-Júnior, E.; Morais, P. A. O.; Scott test associated with multivariate image analysis: A more selective alternative for cocaine research in forensic laboratories. *Forensic Science International* **2022**, *335*, 111277. [Crossref]
34. Gomes, B. R. S.; Santos, J. M.; A fast, low-cost, and nondestructive method using digital images to detect crossing pen ink lines in documents with old and recent writing. *Science & Justice* **2025**, *65*, 101254. [Crossref]
35. Morita, T.; Assumpção, R. M. V.; *Manual de soluções, reagentes e solventes. Padronização, preparação e purificação*, 2a. ed., Edgard Blücher: São Paulo, 1972.
36. Site Python Software Foundation. Disponível em: <<https://www.python.org>>. Acesso em: 05 julho 2025.
37. Site OpenCV. Disponível em: <<http://opencv.org>>. Acesso em: 05 julho 2025.
38. Hunter, J. D.; Matplotlib: A 2D Graphics Environment. *Computing in Science & Engineering* **2007**, *9*, 90. [Crossref]
39. Pedregosa, F.; Varoquaux, G.; Gramfort, A.; Michel, V.; Thirion, B.; Grisel, O.; Blondel, M.; Müller, A.; Nothman, J.; Louppe, G.; Prettenhofer, P.; Weiss, R.; Dubourg, V.; Vanderplas, J.; Passos, A.; Cournapeau, D.; Brucher, M.; Perrot, M.; Duchesnay, É.; Scikit-learn: Machine Learning in Python. *Journal of Machine Learning Research* **2018**, *12*, 2825. [Crossref]
40. Harris, C. R.; Millman, K. J.; van der Walt, S. J.; Gommers, R.; Virtanen, P.; Cournapeau, D.; Wieser, E.; Taylor, J.; Berg, S.; Smith, N. J.; Kern, R.; Picus, M.; Hoyer, S.; van Kerkwijk, M. H.; Brett, M.; Haldane, A.; del Río, J. F.; Wiebe, M.; Peterson, P.; Gérard-Marchant, P.; Sheppard, K.; Reddy, T.; Weckesser, W.; Abbasi, H.; Gohlke, C.; Oliphant, T. E.; Array programming with NumPy. *Nature* **2020**, *585*, 357. [Crossref]
41. Wold, S.; Sjöström, M.; Eriksson, L.; PLS-regression: a basic tool of chemometrics. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems* **2001**, *58*, 109. [Crossref]
42. Fearn, T.; Assessing Calibrations: SEP, RPD, RER and R². *NIR news* **2002**, *13*, 12. [Crossref]
43. Igne, B.; Hurburgh, C. R.; Local chemometrics for samples and variables: optimizing calibration and standardization processes. *Journal of Chemometrics* **2010**, *24*, 75. [Crossref]
44. Abedi-Firoozjah, R.; Yousefi, S.; Heydari, M.; Seyedfatehi, F.; Jafarzadeh, S.; Mohammadi, R.; Rouhi, M.; Garavand, F.; Application of Red Cabbage Anthocyanins as pH-Sensitive Pigments in Smart Food Packaging and Sensors. *Polymers* **2022**, *14*, 1629. [Crossref]
45. Saeys, W.; Mouazen, A. M.; Ramon, H.; Potential for Onsite and Online Analysis of Pig Manure using Visible and Near Infrared Reflectance Spectroscopy. *Biosystems Engineering* **2005**, *91*, 393. [Crossref]
46. Hastuti, D. W.; Harahap, M.; Adila Ferdiansyah, F.; Harmoko Saputro, A.; Imawan, C.; Prediction system for pH measurement on Brassica oleraceae (Red Cabbage) using machine learning regression. *Journal of Physics: Conference Series* **2020**, *1528*, 012050. [Crossref]