ANÁLISE COLORIMÉTRICA DA RESPOSTA DE INDICADORES ÁCIDO-BASE POR DESCRITORES RGB

Flaviane Mendonça Ambrozim, Lucimara Ribeiro Venial, Poliany de Oliveira Barbosa, Vinícius Ferraz Soffiett, Ester Ramos Panciere, Maristela de Araújo Vicente, Maria de Fátima Pereira dos Santos

Universidade Federal do Espírito Santo/Centro Universitário Norte do Espírito Santo, Rodovia Governador Mário Covas, Km 60, s/n, Bairro Litorâneo, 29932-540, São Mateus-ES, Brasil, flaviane.ambrozim@ufes.br

Resumo
A interpretação visual da mudança de cor de indicadores ácido-base pode ser influenciada pela percepção do observador e pelas condições de aquisição, o que justifica a busca por parâmetros quantitativos capazes de representar objetivamente essa resposta. Nesse contexto, este trabalho teve como objetivo avaliar quantitativamente o comportamento dos descritores RGB do azul de bromotimol e do verde de bromocresol. Foram avaliadas 20 imagens correspondentes a quatro condições experimentais, obtidas pela combinação dos dois indicadores com HCl 0,1 mol/L (pH 1,2) e NaOH 0,1 mol/L (pH 10,9). Para cada condição foi preparada uma única solução, da qual foram obtidas cinco fotografias sob condições controladas. Para o azul de bromotimol, entre pH 1,2 e 10,9, os valores médios de R e G diminuíram de 129,8 e 127,4 para 47,0 e 90,9, enquanto B aumentou de 87,4 para 119,5. Para o verde de bromocresol, R e G diminuíram de 136,7 e 134,5 para 65,5 e 108,8, e B aumentou de 98,6 para 128,9. Conclui-se que os descritores RGB representam quantitativamente a mudança cromática entre os dois extremos de pH estudados e apresentam potencial para tornar mais objetiva a avaliação visual dos indicadores sob condições controladas.
Palavras-chave: Colorimetria digital. Indicadores ácido-base. Análise estatística. Visão computacional. RGB.

Área do Conhecimento: Ciências Exatas e da Terra - Química.

Introdução

Indicadores ácido-base apresentam alterações cromáticas associadas às mudanças de pH e são amplamente empregados em análises titulométricas (Chanla *et al*., 2019; Berasarte *et al*., 2024). Entretanto, a interpretação visual pode ser influenciada pela percepção do observador e por condições de aquisição como iluminação, distância e posicionamento da câmera (Fan *et al*., 2021; García Ramos; Silva de Souza Júnior; Borges, 2025). A colorimetria digital permite converter essas respostas em variáveis quantitativas, aumentando a objetividade da avaliação (Fan *et al*., 2021; García Ramos; Silva de Souza Júnior; Borges, 2025).

Câmeras e smartphones têm sido empregados em análises colorimétricas de baixo custo, desde que as condições ópticas sejam controladas (Fan *et al*., 2021; Cebrián *et al*., 2022). Em sistemas ácido-base, sinais RGB obtidos por smartphone acompanharam alterações cromáticas ao longo de titulações e permitiram identificar objetivamente o ponto final (Chanla *et al*., 2019; Berasarte *et al*., 2024; Somnam; Kanna, 2020).

Além do RGB, os espaços HSV e CIELAB fornecem atributos complementares da cor e podem ampliar a caracterização quantitativa das imagens (García Ramos; Silva de Souza Júnior; Borges, 2025). Neste estudo, entretanto, os canais RGB foram adotados como eixo principal da análise por apresentarem interpretação direta da mudança cromática entre os meios ácido e básico, enquanto HSV e CIELAB foram utilizados de forma complementar para caracterizar a distribuição das cores.

Diante desse contexto, o presente trabalho teve como objetivo avaliar quantitativamente o comportamento dos descritores de cor RGB do azul de bromotimol e do verde de bromocresol em meios de pH 1,2 e 10,9, verificando sua utilidade para diferenciar as respostas cromáticas observadas nesses dois extremos de pH.

Metodologia

As 20 imagens analisadas corresponderam a quatro condições experimentais, formadas pela combinação de dois indicadores, azul de bromotimol e verde de bromocresol, com dois meios: HCl 0,1 mol/L, pH 1,2, e NaOH 0,1 mol/L, pH 10,9. Para cada condição foi preparada uma única solução em tubo de ensaio, da qual foram obtidas cinco fotografias sob condições controladas de iluminação, distância e posicionamento. Portanto, as cinco observações de cada condição representam repetições de aquisição de imagem da mesma preparação, e não preparações experimentais independentes. As imagens foram processadas em MATLAB, com segmentação automática da região correspondente à solução, refinamento da região de interesse e extração dos descritores RGB, HSV e CIELAB.

Para cada condição, foram calculados as médias, os desvios-padrão e os coeficientes de variação dos canais R, G e B, utilizados para avaliar a repetibilidade de aquisição e processamento de imagem sob condições controladas. A comparação global das quatro condições foi realizada por ANOVA one-way e, para cada indicador, a comparação entre as aquisições em pH 1,2 e pH 10,9 foi realizada pelo teste t de Welch, adotando-se nível de significância de 5% ($p < 0,05$). Como as cinco imagens de cada condição foram obtidas da mesma preparação, os testes inferenciais foram empregados com caráter exploratório e não representam comparação entre preparações independentes. Os descritores HSV e CIELAB foram mantidos como informações complementares de caracterização cromática. As análises estatísticas foram implementadas em rotina própria em MATLAB.

Resultados

A Tabela 1 apresenta as médias ± desvio-padrão dos descritores de cor para cada uma das quatro condições avaliadas. A interpretação principal foi direcionada aos canais RGB, relacionando suas médias aos dois níveis de pH estudados.

Tabela 1 - Média ± desvio-padrão (n = 5) dos descritores RGB, HSV e CIELAB, por condição.

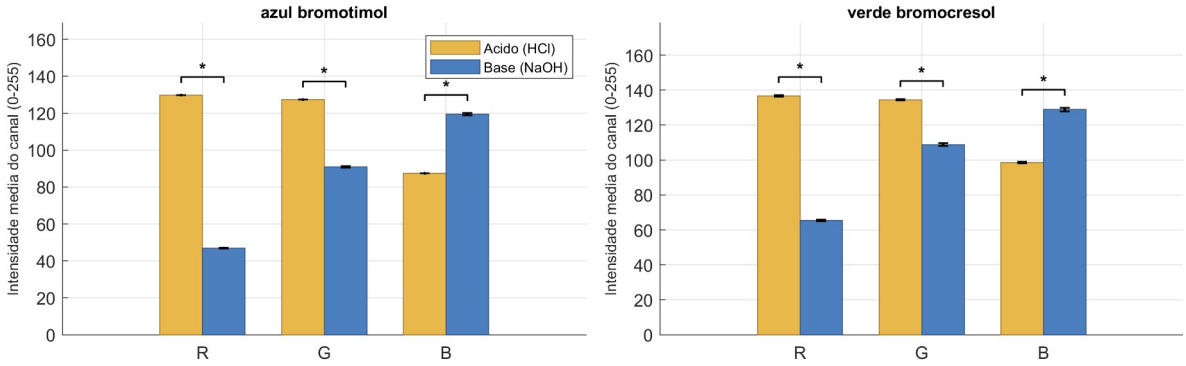
Descritor	HCl + azul bromotimol	HCl + verde bromocresol	NaOH + azul bromotimol	NaOH + verde bromocresol
pH	**1,2**	**1,2**	**10,9**	**10,9**
R	129,8 ± 0,0	136,7 ± 0,5	47,0 ± 0,3	65,5 ± 0,5
G	127,4 ± 0,1	134,5 ± 0,4	90,9 ± 0,5	108,8 ± 0,8
B	87,4 ± 0,0	98,6 ± 0,4	119,5 ± 0,6	128,9 ± 1,0
H (°)	57,1 ± 0,1	56,8 ± 0,3	203,3 ± 0,0	198,7 ± 0,1
S	0,33 ± 0,00	0,28 ± 0,00	0,61 ± 0,00	0,49 ± 0,00
V	0,51 ± 0,00	0,54 ± 0,00	0,47 ± 0,00	0,51 ± 0,00
L*	52,5 ± 0,0	55,3 ± 0,2	36,8 ± 0,2	43,6 ± 0,3
a*	-5,7 ± 0,0	-5,3 ± 0,1	-5,6 ± 0,0	-8,9 ± 0,0
b*	22,0 ± 0,0	19,7 ± 0,1	-20,7 ± 0,1	-15,7 ± 0,1

Fonte: Elaborado pelos autores.

A Figura 1 apresenta a comparação dos valores médios dos canais R, G e B entre pH 1,2 e pH 10,9 para cada indicador. Os valores médios dos canais RGB evidenciaram uma mudança consistente do perfil cromático entre pH 1,2 e pH 10,9. Para o azul de bromotimol, no pH 1,2, foram obtidos R = 129,8, G = 127,4 e B = 87,4; no pH 10,9, os valores passaram para R = 47,0, G = 90,9 e B = 119,5. Para o verde de bromocresol, no pH 1,2, foram observados R = 136,7, G = 134,5 e B = 98,6; no pH 10,9, R = 65,5, G = 108,8 e B = 128,9. Assim, nos dois indicadores, a condição de pH 1,2 apresentou maiores intensidades de R e G e menor intensidade de B, enquanto em pH 10,9 ocorreu redução de R e G e aumento de B. Esse padrão quantifica a mudança de tonalidades amareladas para azuladas entre os dois extremos de pH. Como foram avaliados apenas pH 1,2 e 10,9, esses resultados demonstram contraste entre condições extremas, e não uma relação contínua ou uma calibração de pH.

Os coeficientes de variação dos canais RGB permaneceram inferiores a 1% nas quatro condições, evidenciando baixa variabilidade entre as cinco fotografias de cada preparação e, portanto, elevada repetibilidade de aquisição e processamento de imagem sob condições controladas.

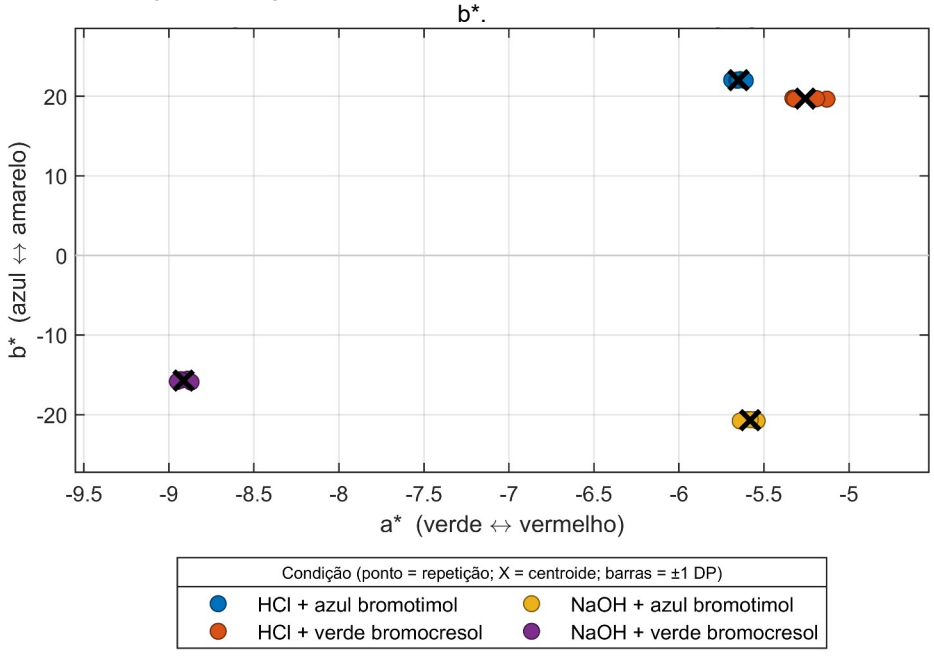
Figura 1 - Comparação dos canais R, G e B (média ± desvio-padrão) entre meio ácido e básico, para os indicadores azul de bromotimol e verde de bromocresol.



* indica diferença estatisticamente significativa pelo teste t de Welch, p < 0,05.
Fonte: Elaborado pelos autores.

A ANOVA one-way aplicada às aquisições indicou diferenças entre as quatro condições experimentais para os canais RGB. O teste t de Welch também indicou diferenças entre as aquisições em pH 1,2 e pH 10,9 para R, G e B em ambos os indicadores (p < 0,05). Esses resultados estatísticos corroboram o contraste observado nos valores médios, porém devem ser interpretados de forma exploratória, pois as cinco observações de cada condição são fotografias repetidas da mesma preparação e não réplicas experimentais independentes.
A Figura 2 apresenta, de forma complementar, a distribuição das 20 imagens no plano de cromaticidade CIELAB (a* × b*). As aquisições em pH 1,2 concentraram-se na região de b* positivo, associada à componente amarela, enquanto aquelas em pH 10,9 apresentaram b* negativo, associado à componente azul. Essa representação complementa o comportamento observado nos canais RGB, sem substituir a análise principal baseada em R, G e B.

Figura 2 - Distribuição colorimétrica das imagens no espaço CIELAB (a* × b*), por condição. Cada ponto corresponde a uma aquisição de imagem; o X marca o centroide e as barras indicam ± 1 desvio-padrão em a* e b*.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Discussão

Os parâmetros RGB permitiram representar quantitativamente a mudança cromática observada entre pH 1,2 e pH 10,9 nos dois indicadores. Em pH 1,2, os maiores valores médios de R e G e os menores valores de B são compatíveis com as tonalidades amareladas observadas. Em pH 10,9, a redução de R e G e o aumento de B acompanham o deslocamento visual para tonalidades azuladas. Para o azul de bromotimol, R diminuiu de 129,8 para 47,0, G de 127,4 para 90,9 e B aumentou de 87,4 para 119,5. Para o verde de bromocresol, R diminuiu de 136,7 para 65,5, G de 134,5 para 108,8 e B aumentou de 98,6 para 128,9. Esse comportamento é coerente com estudos que utilizam sinais RGB para acompanhar respostas cromáticas de indicadores ácido-base por análise digital de imagens (Chanla *et al*., 2019; Berasarte *et al*., 2024; Somnam; Kanna, 2020).

A análise estatística foi utilizada como suporte exploratório à comparação dos perfis de cor. A ANOVA one-way avaliou conjuntamente as quatro condições, enquanto o teste t de Welch comparou, para cada indicador, as aquisições realizadas em pH 1,2 e pH 10,9. Embora os testes tenham indicado diferenças nos canais RGB, sua interpretação deve considerar o delineamento experimental: as cinco observações de cada condição são fotografias repetidas de uma única preparação. Assim, os resultados estatísticos descrevem a separação entre conjuntos de aquisições sob condições controladas, mas não permitem inferir variabilidade entre preparações independentes.

A baixa variabilidade entre as aquisições, com CV inferior a 1% para os canais RGB, demonstra elevada repetibilidade de aquisição e processamento das imagens sob as condições controladas empregadas. Esse resultado é compatível com estudos que destacam a importância da padronização da iluminação, da distância e da geometria de aquisição para a reprodutibilidade da colorimetria digital (Fan *et al*., 2021; García Ramos; Silva de Souza Júnior; Borges, 2025).

Os descritores HSV e CIELAB forneceram informações complementares sobre a organização cromática. No espaço CIELAB, as imagens obtidas em pH 1,2 apresentaram b* positivo, associado à componente amarela, enquanto aquelas obtidas em pH 10,9 apresentaram b* negativo, associado à componente azul. Entretanto, como o objetivo central foi relacionar a resposta cromática aos dois extremos de pH por parâmetros diretamente interpretáveis, a discussão foi concentrada nos canais RGB.

Os resultados devem ser interpretados dentro dos limites do delineamento. Foram avaliados apenas dois valores de pH, 1,2 e 10,9, e cada condição foi representada por uma única preparação com cinco aquisições fotográficas. Portanto, o estudo demonstra diferenças cromáticas e repetibilidade de aquisição e processamento de imagem entre dois extremos de pH, mas não estabelece uma curva de calibração, não permite estimar valores intermediários de pH e não fornece evidência de repetibilidade entre preparações independentes. Além disso, a utilização de um único dispositivo e a ausência de comparação com método instrumental de referência limitam a avaliação da robustez e da acurácia do procedimento.

Para avaliar uma relação quantitativa contínua entre cor e pH, estudos futuros deverão incluir diferentes níveis de pH, especialmente nas faixas de viragem do azul de bromotimol e do verde de bromocresol, além de preparações independentes em cada nível e medição simultânea por pHmetro ou método instrumental de referência. Esse delineamento permitirá avaliar a variabilidade experimental, a sensibilidade, a faixa de resposta e a possibilidade de calibração dos descritores colorimétricos.

Conclusão

Os descritores RGB permitiram discriminar quantitativamente as respostas do azul de bromotimol e do verde de bromocresol entre pH 1,2 e pH 10,9. Em ambos os indicadores, a condição ácida apresentou maiores valores de R e G e menor valor de B, enquanto a condição básica apresentou redução de R e G e aumento de B. A ANOVA indicou diferenças entre as condições experimentais e o teste t de Welch confirmou diferenças significativas entre os dois níveis de pH para os canais RGB. Assim, a análise digital de imagens mostrou-se adequada para distinguir objetivamente os dois extremos de pH avaliados, sem que esses resultados sejam interpretados como calibração contínua de pH. Estudos futuros com níveis intermediários e método instrumental de referência serão necessários para avaliar a capacidade quantitativa do procedimento ao longo da faixa de viragem dos indicadores.

Referências

BERASARTE, I.; BORDAGARAY, A.; GARCIA-ARRONA, R.; OSTRA, M.; REIS DE ARAUJO, W.; VIDAL, M. Microscale titration of acetic acid using digital colorimetry and paper-based analytical devices. **Talanta**, v. 276, 126254, 2024. DOI: 10.1016/j.talanta.2024.126254.

CEBRIÁN, P.; PÉREZ-SIENES, L.; SANZ-VICENTE, I.; LÓPEZ-MOLINERO, Á.; DE MARCOS, S.; GALBÁN, J. Solving color reproducibility between digital devices: a robust approach of smartphones color management for chemical (bio)sensors. **Biosensors**, v. 12, n. 5, 341, 2022. DOI: 10.3390/bios12050341.

CHANLA, J.; KANNA, M.; JAKMUNEE, J.; SOMNAM, S. Application of smartphone as a digital image colorimetric detector for batch and flow-based acid-base titration. **Chiang Mai Journal of Science**, v. 46, n. 5, p. 975-986, 2019.

FAN, Y.; LI, J.; GUO, Y.; XIE, L.; ZHANG, G.-C. Digital image colorimetry on smartphone for chemical analysis: a review. **Measurement**, v. 171, 108829, 2021. DOI: 10.1016/j.measurement.2020.108829.

GARCÍA RAMOS, J.; SILVA DE SOUZA JÚNIOR, R.; BORGES, E. M. How digital images are transforming chemical education: a review of laboratory-based applications. **ACS Omega**, v. 10, p. 32651-32672, 2025. DOI: 10.1021/acsomega.5c05125.

SOMNAM, S.; KANNA, M. Flow-based titration with a colorimetric detection box using a smartphone for the determination of titratable acidity in coffee. **ScienceAsia**, 2020. DOI: 10.2306/scienceasia1513-1874.2020.004.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001, Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo (FAPES). Os autores também agradecem ao Laboratório de Prepara de Amostras e Análises Químicas (LaPAQui), ao Programa de Pós-Graduação em Energia (PPGEN), ao Centro Universitário Norte do Espírito Santo (CEUNES) e à Universidade Federal do Espírito Santo (UFES) pelo suporte institucional e infraestrutura concedidos para a realização desta pesquisa.