

Artigo de Revisão

USO DE IMAGENS DIGITAIS BASEADAS EM *SMARTPHONE* NA QUÍMICA ANALÍTICA: UMA REVISÃO EM PESQUISAS REALIZADAS NO BRASIL

Smartphone-based digital images in analytical chemistry: a review of research carried out in Brazil

Renata Bittencourt Amaral^{1,2}, Elaine Rocha da Luz^{1*}

¹Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Rio de Janeiro (IFRJ), Nilópolis, RJ, Brasil.

²DQBIO - Universidade Federal de São João Del Rei (UFSJ), São João Del Rei, MG, Brasil.

Submetido em: 01.08.2024; Aceito em: 22.10.2024; Publicado em: 18.11.2024.

*Autor para correspondência: elaine.luz@ifrj.edu.br

Resumo: A fotometria de imagens digitais baseadas em *smartphone* (SDI) tem sido amplamente explorada para uma variedade de aplicações analíticas devido às suas vantagens, como portabilidade, baixa demanda de energia, economia, facilidade de uso e ampla disponibilidade de instrumentação. Tal tecnologia se apresenta como uma alternativa para a democratização da química analítica de modo que as metodologias desenvolvidas a partir dela sejam facilmente acessíveis a qualquer pessoa que as necessite, diminuindo as diferenças nas capacidades de aplicação de ferramentas analíticas entre países desenvolvidos e em desenvolvimento. Pensando nisso, esta revisão concentra-se no uso de imagens digitais baseadas em *smartphone* em química analítica por pesquisadores brasileiros, com o objetivo de desenhar um panorama atual sobre o assunto, além de apresentar diferentes possibilidades aos pesquisadores que desejam investir no tema, contribuindo para uma química analítica mais disponível para todos.

Palavras-chave: fotometria; imagens digitais baseadas em *smartphone*; química analítica democrática.

Abstract: Smartphone-based digital imaging (SDI) photometry has been widely explored for a variety of analytical applications due to its advantages such as portability, low power demand, cost-effectiveness, ease of use, and wide availability of instrumentation. This technology presents itself as an alternative for the democratization of analytical chemistry so that the methodologies developed from it are easily accessible to anyone who needs them, reducing differences in the capabilities of applying analytical tools between developed and developing countries. This review focuses on the use of digital images based on *smartphone* in analytical chemistry by Brazilian researchers, with the aim of drawing a current panorama on the subject, in addition to presenting different possibilities to researchers who wish to invest in the topic, contributing to an analytical chemistry more available to everyone.

Keywords: photometry; *smartphone*-based digital images; democratic analytical chemistry.

INTRODUÇÃO

A Química Analítica é o ramo mais antigo da Química e é o bloco de base sobre o qual outros ramos, conhecidos como inorgânico, orgânico, físico-químico e bioquímico, cresceram até o seu nível atual. A compreensão desses ramos não teria sido possível sem a aplicação dos princípios da química analítica. Ela nos forneceu um vislumbre da matéria, desde estruturas atômicas simples até moléculas complexas. A compreensão da composição química contribuiu para a melhoria das características dos recursos naturais e industriais para o benefício da humanidade. Hoje não podemos pensar em um único produto de uso comercial que não tenha sido testado usando técnicas de química analítica (DEEPAK, 2012).

Pode-se afirmar, portanto, que a química analítica desempenha um papel importante em nossa sociedade, atuando em diferentes campos como na fabricação de medicamentos, controle de processos na indústria, monitoramento ambiental, diagnósticos médicos, produção de alimentos e pesquisas forenses. Além disso, é de grande importância em diferentes áreas da pesquisa científica por ser uma ciência voltada para a criação de novos conhecimentos para que a análise química possa ser aprimorada para responder a novas e crescentes demandas. Sem ela, por exemplo, não poderíamos tomar decisões importantes sobre a remediação do solo, sobre os valores-limite para a poluição ambiental ou como escolher tratamentos médicos adequados (BERGQUIST & TURNER, 2018).

A química analítica clássica, também conhecida como “via úmida”, introduziu os estudos qualitativos e quantitativos e até hoje constitui a espinha dorsal da maioria dos laboratórios universitários e industriais. A espectroscopia de emissão de chama foi a primeira técnica instrumental usada em 1860 por Bunsen e Kirchhoff para a descoberta de rubídio e célio. A maioria dos desenvolvimentos em química analítica ocorreu após 1900 e significativamente após 1970, com avanços nos métodos instrumentais de análise. A análise instrumental complementou a análise tradicional com velocidade e precisão, evoluindo para várias áreas especializadas, como espectroscopia, cromatografia e eletroanalítica. Tornou-se possível detectar componentes de amostras em faixas de concentração de níveis percentuais a ppm, ppb ou até níveis mais baixos (DEEPAK, 2017).

Com o tempo, a química analítica mudou. As tecnologias e instrumentos analíticos foram desenvolvidos por centenas de anos pelos próprios pesquisadores ou em lojas de ferramentas e oficinas. Hoje em dia, o desenvolvimento de instrumentos é conduzido por fabricantes que dominam a tecnologia e disponibilizam no mercado instrumentos cada vez mais completos e complexos, mas também cada vez mais caros. A única exceção talvez seja a busca contínua dos pesquisadores pela miniaturização das técnicas e pela integração de plataformas analíticas. A área de pesquisa da química analítica migrou da construção de instrumentos para o desenvolvimento de métodos para atender a aplicações específicas (BERGQUIST & TURNER, 2018).

O desenvolvimento de métodos analíticos envolve a obtenção de métodos mais rápidos, mais sensíveis, mais simples e mais informativos. Para isso, o desenvolvimento e a validação incluem a otimização de alguns parâmetros analíticos críticos, tais como precisão, sensibilidade, seletividade, reprodutibilidade, simplicidade, eficácia, custo, flexibilidade e velocidade. No entanto, outros aspectos relacionados à segurança do operador e ao impacto ambiental dos métodos analíticos não eram frequentemente considerados. Por essa razão, uma situação paradoxal surgiu durante a década de 1990, devido aos efeitos colaterais de metodologias analíticas desenvolvidas para analisar diferentes tipos de amostras, incluindo a geração de grande quantidade de resíduos químicos, resultando em um grande impacto ambiental e humano. Em algumas circunstâncias, os produtos químicos empregados para análise eram ainda mais tóxicos do que as espécies que estavam sendo determinadas (ARMENTA *et al.*, 2008).

Levando em conta a atual preocupação com as questões ambientais, a necessidade de verificação cuidadosa dos efeitos colaterais da química em geral, e da química analítica em particular, levou laboratórios a controlar e coletar resíduos para evitar a contaminação da água e dos resíduos sólidos urbanos. Com esse enfoque, a Química Analítica Verde (GAC, do termo em inglês “*Green Analytical Chemistry*”) começou uma busca pelo desenvolvimento de alternativas práticas ao tratamento *off-line* de resíduos, a fim de substituir metodologias poluentes por limpas. Tais desenvolvimentos estariam ainda mais completos com as estipulações da química analítica verde e democrática que se concentram não apenas na redução do impacto ambiental dos procedimentos analíticos, mas também na sua ampla disponibilização em termos de baixo custo e aplicabilidade (CHEMAT *et al.*, 2019; MARCINKOWSKA *et al.*, 2019; KALINOWSKA *et al.*, 2021).

Desse modo, o desenvolvimento de novas ferramentas analíticas deve levar em conta tanto a otimização do procedimento quanto os aspectos econômicos da análise. Além disso, talvez seja igualmente importante considerar os aspectos sociais às vezes esquecidos durante a tomada de decisão e o desenvolvimento do processo, que é a ideia principal por trás do conceito de química sustentável. Responsabilidade social em química analítica também significa a transferência de informações para a sociedade de maneira completa, compreensível e contextualizada (MARCINKOWSKA *et al.*, 2019).

A dimensão social da sustentabilidade significa que os procedimentos e dispositivos analíticos, os resultados das análises e a possibilidade de realizar medições são facilmente acessíveis a qualquer pessoa que os necessite. Isso pode ser alcançado pela aplicação de dispositivos “domésticos” que permitam realizar análises facilmente por usuários não treinados. Deve-se ressaltar que esse conceito diminui as diferenças nas capacidades de aplicação de ferramentas analíticas entre países desenvolvidos e em desenvolvimento (KALINOWSKA *et al.*, 2021; MARCINKOWSKA *et al.*, 2019).

No artigo de revisão intitulado “Precisamos de química analítica verde?”, Koel (2016) aponta que os resultados analíticos nem sempre precisam ser extremamente precisos, limites de detecção muito baixos não precisam ser sempre atingidos e equipamentos sofisticados não precisam ser sempre utilizados. Ele também enfatiza que as tendências de pesquisa em química analítica não atendem às necessidades de aplicar testes simples do tipo indicador para obter informações analíticas básicas, às vezes semiquantitativas. Na verdade, esse tipo de informação é frequentemente exigido pela sociedade, para responder a questões como: O composto está presente ou não? O material é seguro em relação ao parâmetro químico fornecido? A pessoa deve tomar o remédio? (MARCINKOWSKA *et al.*, 2019).

Pensando nisso, um dos efeitos do desenvolvimento de uma química analítica democrática, conceito introduzido por de la Guardia e Garrigues (2019), deve ser a redução dos custos do método, baseado na redução das etapas analíticas e do tratamento das amostras, na miniaturização e na automação dos procedimentos em conjunto com o tratamento *on-line* de resíduos e com a redução do consumo de energia.

Alguns exemplos dos avanços em instrumentos de baixo custo podem ser mencionados. O trabalho pioneiro de Abu-Samra, Morris e Koirtyohann (1975) abriu caminho para o uso de fornos de micro-ondas domésticos para digestão de amostras. Armenta, de la Guardia e Esteve-Turrillas (2016) propuseram o uso de máquina de café expresso para extrair contaminantes orgânicos de amostras sólidas. Destaca-se também que aplicações de dispositivos baseados em papel em ambientes com recursos limitados, bem como em casos de emergência, atribuições de campo militar e saúde domiciliar estão ganhando importância globalmente. Esses dispositivos são mais comumente usados para análises colorimétricas usando um sistema de detecção baseado em imagens ópticas, são fáceis de usar e podem ser usados em áreas remotas. Apresentam ainda consumo de volume reduzido, baixa produção de resíduos e a grande portabilidade do dispositivo levaram ao rápido desenvolvimento de dispositivos microfluídicos baseados em papel (ARAÚJO & PAIXÃO, 2014). Outras vantagens do papel são: baixo custo, ser descartável, dobrável e

disponível globalmente, além de ser um bom contraste para as medições colorimétricas (DA SILVA *et al.*, 2018). Diante dessa tendência atual da química analítica para o desenvolvimento de análises rápidas, práticas e econômicas, mesmo por usuários não especialistas, o presente trabalho destaca a fotometria de imagens digitais baseadas em *smartphone* (SDI, do termo em inglês *smartphone-based digital images*) como uma das mais promissoras. Nas últimas duas décadas, houve vários exemplos de uso da tecnologia de *smartphones* em pesquisa de química analítica, principalmente com aplicação em análises químicas colorimétricas. Em geral, as análises com *smartphones* são atraentes porque são compactas, portáteis e fáceis de usar e, presumindo que o analista já possua um *smartphone*, são geralmente de baixo custo.

Como resultado, os *smartphones* surgem como ferramentas interessantes do ponto de vista da GAC, pois podem ser utilizados em análises de campo, como monitoramento ambiental e análises agronômicas e de combustíveis, inclusive em regiões remotas, além de bastante atrativas para países em desenvolvimento (DESTINO & CUNNINGHAM, 2020). Além disso, devido à portabilidade e possibilidade de medições fotométricas com baixos volumes de solução, pelo menos outros três princípios da GAC são cumpridos: miniaturização, baixa demanda de energia e baixo consumo de reagentes e geração de resíduos (GALUSZKA *et al.*, 2013).

A fotometria de imagens digitais baseadas em *smartphone* está relacionada à atenuação da radiação incidente de forma análoga à espectrofotometria UV-visível, mas, ao invés da radiação transmitida, o que é medido é a intensidade da radiação refletida (KALINOWSKA *et al.*, 2021). Embora numericamente diferentes, dependendo da base de medição e da abordagem de processamento de dados, os valores são comumente proporcionais à absorvância e a lei de Beer é geralmente obedecida, ou seja, o parâmetro medido varia linearmente com a concentração das espécies absorventes (KUNTZLEMAN & JACOBSON, 2015; SOARES, FERNANDES & ROCHA, 2023).

Embora as imagens digitais possam ser adquiridas com uma variedade de dispositivos, tais como *scanners* (FABRIS *et al.*, 2020; GONÇALVES *et al.* 2020), câmeras digitais (BENEDETTI *et al.*, 2015) e *webcams* (ZAMPIER *et al.* 2021), as câmeras de *smartphones* são preferidas em aplicações analíticas devido à sua portabilidade, acessibilidade e custo relativamente baixo em comparação com espectrofotômetros. Nos últimos anos, diferentes grupos de pesquisa brasileiros têm utilizado a análise de imagens digitais obtidas com aparelhos celulares como ferramenta analítica em diversas áreas do conhecimento, tais como: controle da qualidade de fármacos (FERNANDES, *et al.*, 2023), análise de alimentos (ALVES *et al.*, 2023; DE CARVALHO *et al.*, 2023), verificação da falsificação de cédulas e documentos (COSTA *et al.*, 2022), combustíveis (HOLKEM *et al.*, 2021; SOARES *et al.*, 2023) e controle da qualidade da água (BAUMANN *et al.*, 2019; NASCIMENTO *et al.*, 2023).

Pensando em tudo isso, uma revisão bibliográfica sobre o uso de imagens digitais baseadas em *smartphones* na química analítica, especialmente aquelas realizadas por pesquisadores brasileiros, mostra-se de grande importância para desenhar um panorama atual sobre este assunto, além de apresentar diferentes possibilidades aos pesquisadores que desejam investir no tema, contribuindo para uma química analítica mais disponível para todos.

MATERIAL E MÉTODOS

Para a revisão bibliográfica foi realizada uma pesquisa exploratória utilizando a ferramenta de busca Google Acadêmico e as bases de dados *Scientific Electronic Library Online* (SciELO) e do portal de periódicos da CAPES, utilizando termos como: “*smartphone-based digital images*”, “*digital image colorimetry*”, “*digital image photometry*” e “*digital images analytical chemistry*”, além dos mesmos termos e correlatos em português. Foram selecionados artigos de revistas científicas, escritos em português ou inglês, publicados por pesquisadores brasileiros, entre 2013 e 2023. Não foram incluídos os artigos voltados para o ensino de química.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A pesquisa bibliográfica realizada levantou um total de 68 artigos científicos, sendo 63 com foco no desenvolvimento de metodologias analíticas a partir da fotometria de imagens digitais baseadas em *smartphone*, 2 artigos de revisão e 3 que exploravam o uso de aplicativos para análise colorimétrica com dispositivos móveis desenvolvidos por pesquisadores brasileiros. Esses artigos foram de autoria de pesquisadores de vários estados brasileiros, como pode ser visto na Figura 1a, com destaque para as regiões sul e sudeste e, principalmente, para o estado de São Paulo. Além disso, cabe ressaltar que todos esses trabalhos foram realizados em instituições públicas de ensino ou pesquisa, como mostrado na Figura 1b.

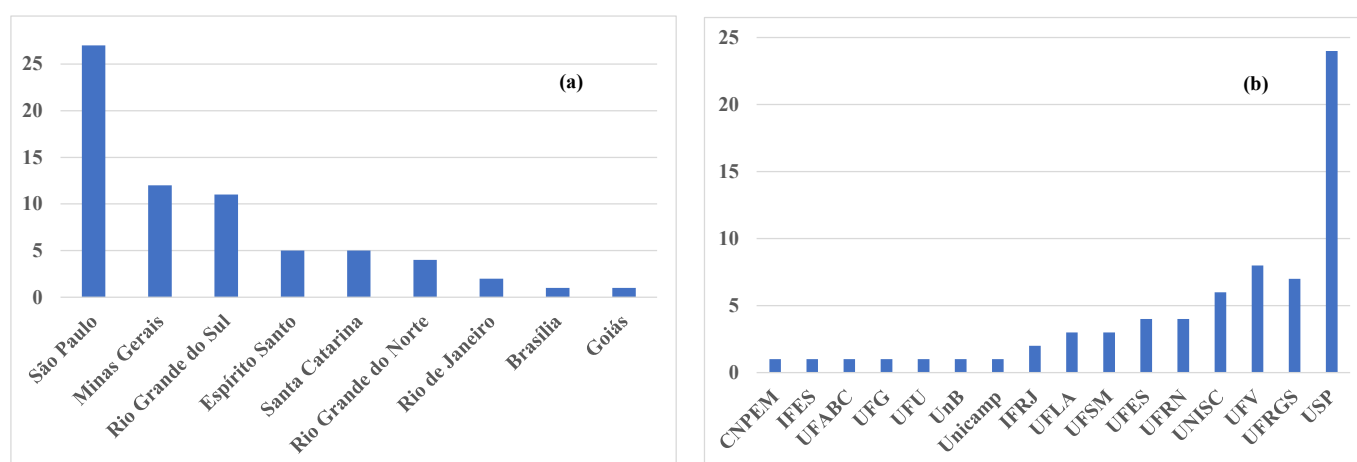


Figura 1. Levantamento bibliográfico de pesquisas realizadas no Brasil com o uso de SDI na química analítica de acordo com o estado brasileiro (a) e a instituição de origem (b).

O número de publicações vem crescendo desde 2016, acompanhando uma tendência mundial (SOARES, FERNANDES & ROCHA, 2023), e teve um aumento significativo em 2023 (Figura 2a). As aplicações focaram principalmente nas áreas de alimentos e bebidas (48%), ambiental (19%), combustíveis e biocombustíveis (13%), fármacos e fluidos biológicos (11%), e análises forenses (8%) (Figura 2b). Cabe ressaltar que dentre os artigos que foram encontrados na área de combustíveis e biocombustíveis, seis tinham o biodiesel como analito ou amostra, e apenas um foi encontrado para etanol e outro para óleo cru.

É interessante notar que na revisão publicada por Soares, Fernandes e Rocha (2023), as aplicações focaram principalmente em questões ambientais e análises clínicas, 27% cada, ficando alimentos e bebidas com 22% e combustíveis e biocombustíveis com apenas 0,4%. O destaque dado pelos pesquisadores brasileiros às áreas de alimentos e bebidas e biocombustíveis reflete a importância que a agropecuária tem para o país como setor produtivo (CNI, 2023). Além disso, o Brasil possui papel de destaque no cenário mundial de produção e uso de biocombustíveis, em especial com relação ao etanol produzido a partir de cana-de-açúcar e ao biodiesel de óleos vegetais ou de gorduras animais, além de ser o único país do mundo em que o uso de biocombustíveis superou 10% da demanda de energia para transportes (VIDAL, 2021).

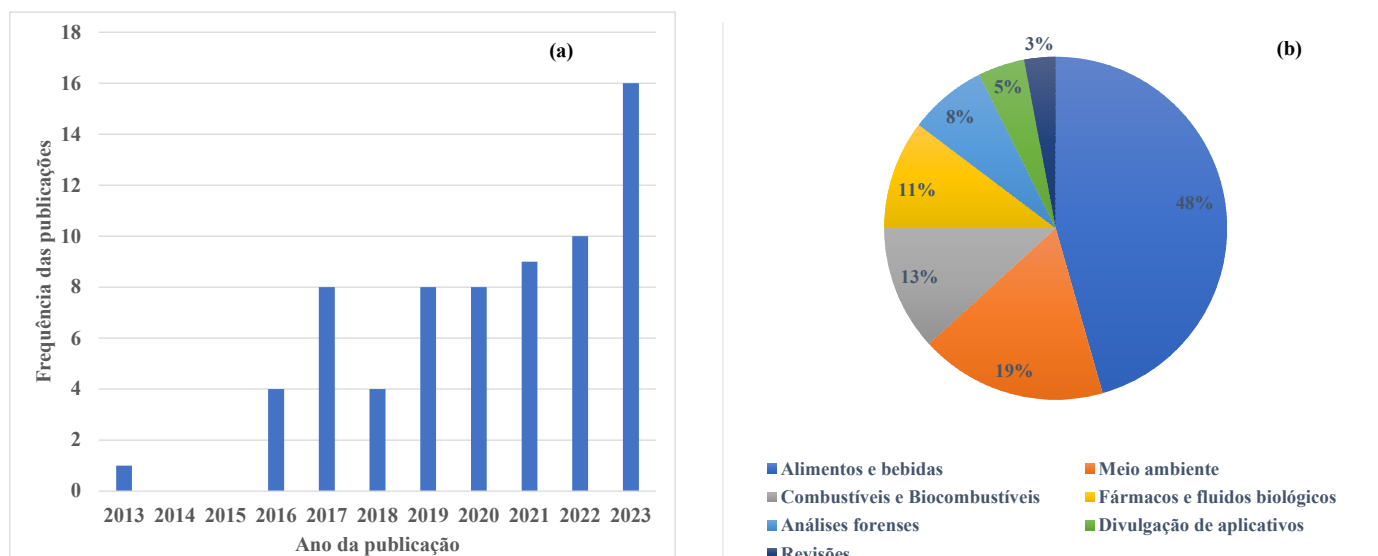


Figura 2. Levantamento bibliográfico de pesquisas realizadas no Brasil com o uso de SDI na química analítica de acordo com o ano da publicação (a) e a área de aplicação (b).

O uso dos dados de SDI envolve a extração de informações analíticas com base em um sistema de cores, tais como RGB, CMYK, HSV ou XYZ, usando aplicativos como Photometrix® (FERNANDES, *et al.*, 2023), Colorgrab® (ALVES *et al.*, 2023), bem como softwares comerciais como ImageJ® (Martins, Soares e Rocha, 2023) ou ainda projetados sob medida (SALLES, *et al.*, 2013). A escolha adequada do sistema de cores e o processamento dos dados são essenciais para obter resultados confiáveis.

A principal limitação das SDI é sua aplicabilidade restrita à faixa eletromagnética visível, pois as câmeras são configuradas com filtros baseados no sistema de cores RGB, que imita a visão humana explorando componentes vermelhos, verdes e azuis para reproduzir o espectro eletromagnético visível (Figura 3). As faixas espectrais cobertas pelos canais R, G e B são 550 a 750 nm, 450 a 650 nm e 400 a 550 nm, respectivamente (SOARES, FERNANDES & ROCHA, 2023).

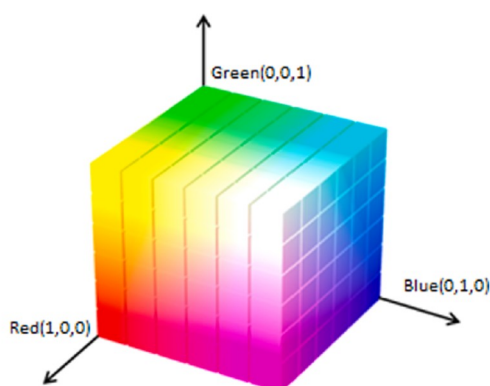


Figura 3: Espaço de cores RGB (FAN *et al.*, 2021).

Há algumas possíveis abordagens para aquisição de imagens digitais baseadas em *smartphones*, mas o sistema de cores RGB tem predominado em aplicações analíticas (FAN *et al.*, 2021), inclusive nas pesquisas realizadas no Brasil (Figura 4a). Além disso, diferentes respostas analíticas já foram exploradas por combinações matemáticas do espaço de cores RGB, muitas vezes visando obter uma melhor correlação linear entre o sinal analítico e a concentração do analito (QUISPE & SÁEZ, 2023).

No entanto, os pesquisadores brasileiros preferem trabalhar com a medida direta de um dos canais RGB ou ainda utilizando abordagens multivariadas (Figura 4b). No caso da análise multivariada, um algoritmo desdobra a região de interesse da imagem no canal RGB e a armazena em formato histograma. Um histograma de imagem é uma representação gráfica da distribuição total em uma imagem digital, ou o número de pixels para cada valor tonal. Cada canal gera 256 variáveis, portanto um histograma RGB completo apresenta 768 variáveis por imagem de amostra (HELFER *et al.*, 2018).

Outra abordagem interessante é converter as medidas de cor em uma espécie de absorvância (A), que é o log negativo da transmitância (I/I_b), que seria então calculada usando a seguinte fórmula $A = -\log(I/I_b)$, em que I denota o valor R, G ou B da amostra e I_b o valor R, G ou B do branco, ambos obtidos da imagem experimental (KEHOE & PENN, 2013).

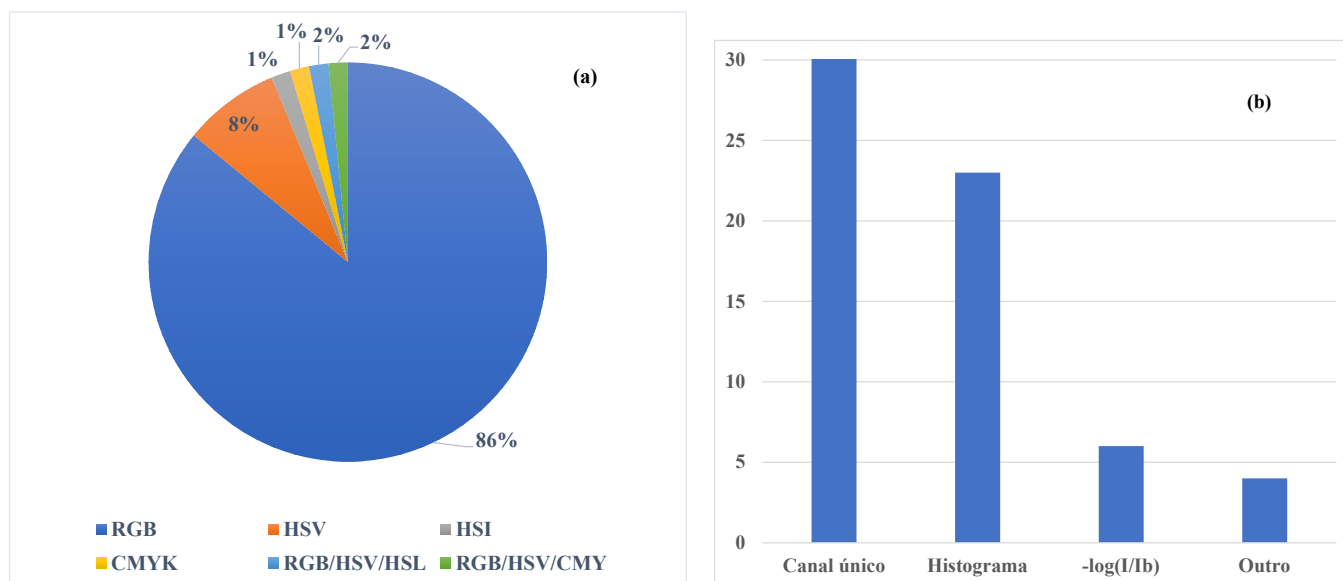


Figura 4. Levantamento bibliográfico de pesquisas realizadas no Brasil com o uso de SDI na química analítica de acordo com o sistema de cores (a) e o processamento dos dados (b).

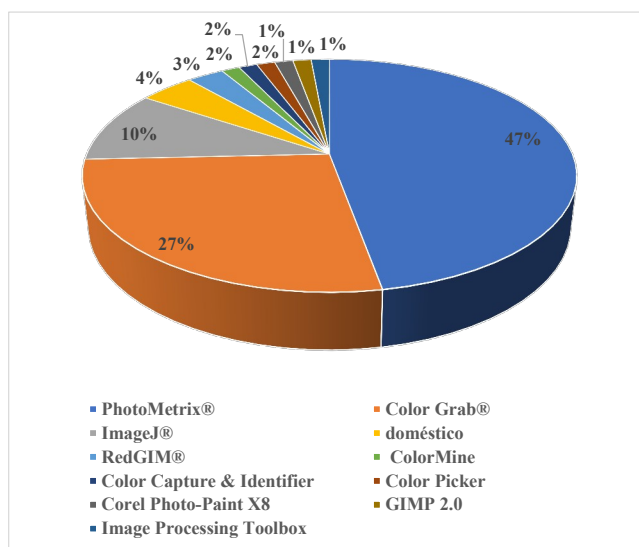


Figura 5. Levantamento bibliográfico de pesquisas realizadas no Brasil com o uso de SDI na química analítica de acordo com o aplicativo utilizado.

Para demonstrar a qualidade da pesquisa realizada no Brasil com o uso de SDI em química analítica podemos destacar dois pontos importantes: a maioria dos pesquisadores usou aplicativos desenvolvidos por brasileiros (Photometrix, RedGIM e aplicativos domésticos), como pode ser visto na Figura 5, e 59% dos artigos foram publicados em periódicos com fator de impacto maior que 3 (Figura 6). Além disso, em revisão sobre o tema publicada por pesquisadores da USP (SOARES, FERNANDES & ROCHA, 2023) o Brasil aparece como o sexto país em número de publicações, com 5,1% dos artigos publicados.

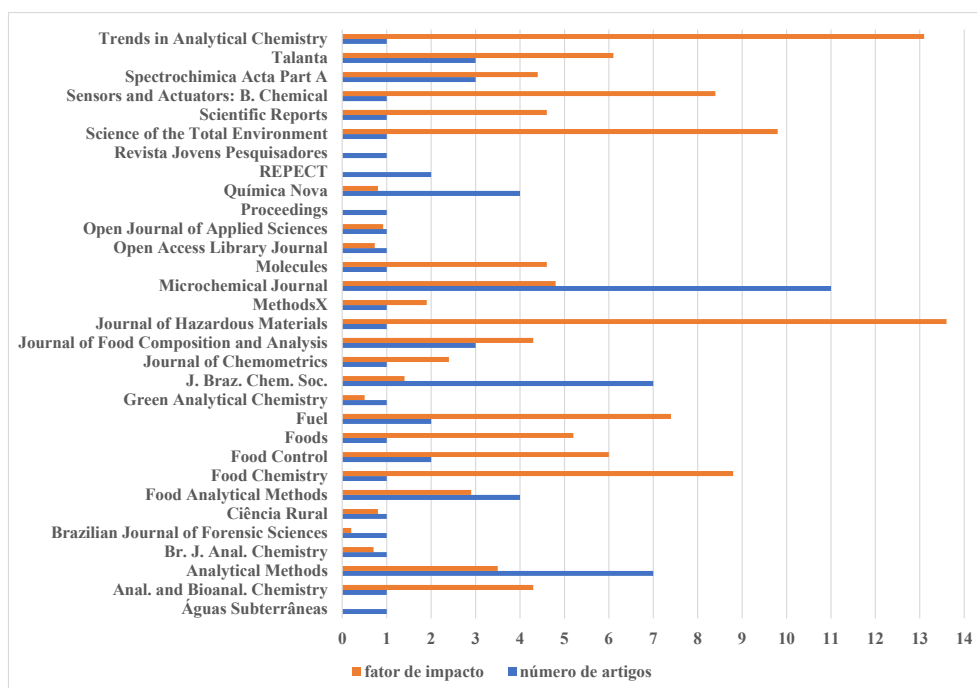


Figura 6. Levantamento bibliográfico sobre pesquisas realizadas no Brasil com o uso de imagens digitais baseadas em smartphones na química analítica de acordo com o periódico em que foi publicado e seu fator de impacto.



- **Artigos de revisão**

Os dois artigos de revisão foram publicados pelos dois principais grupos de pesquisa brasileiros em atividade na área de imagens digitais em química analítica: o grupo dos professores Marcos Flores Ferrão e Adilson Ben da Costa, da UFRGS e da UNISC, respectivamente, e o do professor Fábio Rodrigo Piovezani Rocha, da USP.

A primeira revisão, “*PhotoMetrix and colorimetric image analysis using smartphones*” (BÖCK *et al.*, 2020), publicada em maio de 2020, teve como objetivo relacionar trabalhos anteriores que utilizaram *smartphones* para aquisição de imagens para fins analíticos, com foco especial no aplicativo PhotoMetrix, que é uma ferramenta para análises químicas colorimétricas desenvolvida por pesquisadores brasileiros. Segundo os autores, o PhotoMetrix permite a decomposição de imagens digitais adquiridas por câmeras de *smartphones* e seu processamento dentro do mesmo dispositivo, permitindo análises *in situ*. Até junho de 2024, esse artigo contava com 67 citações de acordo com a ferramenta de busca Google Acadêmico.

O trabalho da pesquisadora Böck e colaboradores apresentou os artigos organizados de acordo com o ano de publicação e o método de processamento: dentro ou fora do *smartphone*. Os autores consideraram que o processamento de dados no *smartphone* significava que a captura das imagens, a decomposição, o processamento e a geração dos resultados eram realizados pelo próprio *smartphone*, por meio de aplicativos específicos. Foram compiladas 125 referências, 66 que processaram os dados externamente e 59 que utilizaram aplicativos instalados no *smartphone*, dentre as quais 17 que utilizaram o PhotoMetrix. Mais detalhes sobre o aplicativo PhotoMetrix serão apresentados no tópico seguinte.

Já a segunda revisão, “*Smartphone-based digital images in analytical chemistry: Why, when, and how to use*” (SOARES *et al.*, 2023), publicada em novembro de 2023, já contava com 17 citações em junho de 2024 de acordo com a ferramenta de busca Google Acadêmico. Segundo os autores, essa revisão teve como objetivo apresentar uma visão crítica das SDI, destacando suas vantagens e desafios, bem como estratégias para alcançar resultados confiáveis. Essa publicação evidencia a qualidade da pesquisa brasileira, pois trata-se de um artigo de revisão publicado na revista *Trends in Analytical Chemistry*, uma revista da editora Elsevier que traz notícias sobre tendências e desenvolvimentos em análises químicas e tem um dos maiores fatores de impacto em Química Analítica entre mais de 80 revistas internacionais (ZAMBON, 2018).

A pesquisa realizada por Samara Soares e seus colaboradores organizou o tema de modo bastante completo e didático, apresentando as vantagens e desvantagens do uso das SDI em química analítica, a importância da escolha do sistema de cores adequado, os efeitos dos principais parâmetros sobre a aquisição de imagens digitais, os diferentes tipos de processamento de dados para obtenção de resultados confiáveis, além de apresentar diversos exemplos de aplicações analíticas, incluindo triagem, classificação e análises quantitativas em diferentes áreas.

- **Divulgação de aplicativos**

Uma das principais vantagens do uso de SDI em química analítica dá-se pela ampla disponibilidade de *smartphones* com câmeras de alto desempenho e capacidades de processamento, incluindo aplicativos gratuitos para conversão de imagens e tratamento de dados, alguns dos quais também incluem ferramentas de calibração univariada e multivariada, tais como análise dos componentes principais (PCA) e regressão dos mínimos quadrados parciais (PLS). Dois pesquisadores brasileiros desenvolveram aplicativos para esse fim e os disponibilizaram gratuitamente, e três artigos foram publicados com o objetivo de apresentá-los: PhotoMetrix (HELPER *et al.*, 2017), PhotoMetrix UVC (DA COSTA *et al.*, 2021) e RedGIM (ROSA *et al.*, 2022).

O PhotoMetrix e o Photometrix UVC, disponíveis para Android, iOS e Windows Mobile, são utilizados por pesquisadores em todo o mundo (HELPER, 2024). Esses aplicativos foram desenvolvidos pelo pesquisador Gilson Augusto Helfer, pertencente ao grupo de pesquisa dos professores Marcos Flores Ferrão e Adilson Ben da Costa, e um dos autores dos artigos citados acima.

No artigo publicado por Helfer e colaboradores (2017), o PhotoMetrix, que teve sua primeira versão gratuita disponível em 2015, é apresentado como um aplicativo para calibração univariada e análise exploratória de dados multivariados a partir da decomposição de imagens digitais adquiridas pelo uso da câmera principal de *smartphones*, associado ao uso de regressão linear simples e PCA, respectivamente. O módulo univariado foi testado na quantificação de ferro em amostras de comprimidos (sulfato ferroso) e os resultados foram estatisticamente equivalentes ($p > 0,05$) em comparação ao método de referência. Para ilustrar o módulo de análise multivariada utilizando o PCA de imagens digitais, foram escolhidas imagens de cédulas apresentando diferentes cores, tons e texturas e os resultados mostraram agrupamento dos mesmos tipos de cédulas.

Já o PhotoMetrix UVC, apresentado no artigo publicado por da Costa e colaboradores (2021), é proposto para a utilização com uma câmera externa conectada ao *smartphone* através de uma conexão USB, permitindo a construção de um dispositivo que possa superar algumas limitações, tais como a dificuldade em padronizar e transferir os experimentos devido a diferença entre as câmeras dos dispositivos móveis. Além disso, esse aplicativo permite a análise multivariada das imagens digitais capturadas, que são convertidas em histogramas vermelho, verde e azul (RGB) e modelos de regressão PLS são utilizados dentro do aplicativo. Para demonstrar a usabilidade do aplicativo foram determinados quatro adulterantes em amostras de leite cru e não foram identificadas diferenças significativas ($p < 0,05$) entre os valores medidos e os previstos.

O aplicativo RedGIM, disponível na plataforma Android, foi desenvolvido em 2016 pelo pesquisador Thalles Ramon Rosa, professor do Instituto Federal do Espírito Santo, para auxiliar em análises químicas com o uso de dados de imagens digitais e métodos quimiométricos. O artigo publicado por Rosa *et al.* (2022) abordou a divulgação do aplicativo como sendo capaz de trabalhar com análise multivariada de imagens utilizando os métodos PCA e PLS através das intensidades luminosas de fotos e canais R (vermelho), G (verde) e B (azul). Para mostrar o potencial do RedGIM, propuseram duas aplicações utilizando PLS: a quantificação de cloro livre em água da torneira, e a quantificação de canabidiol, em amostras de maconha e haxixe. Os resultados obtidos pelo aplicativo foram compatíveis com resultados de técnicas tradicionais, como a espectrofotometria UV-Vis. Concluíram que o RedGIM demonstrou ser uma ferramenta tecnológica simples e acessível à comunidade científica, sendo viável para testes químicos de natureza multivariada.

• Aplicações

O uso de SDI destaca-se na química analítica pelo potencial para desenvolver métodos rápidos e de baixo custo para diversas aplicações, incluindo triagem, classificação e análises quantitativas de diferentes tipos de amostras. Todos os artigos levantados foram classificados de acordo com as áreas de aplicação e, para cada uma delas, será apresentada uma tabela com o objetivo do método analítico (analito x amostra), além do sinal analítico e aplicativos utilizados. Além disso, alguns exemplos ilustrativos serão apresentados com mais detalhes, com ênfase nos artigos mais recentes.



• Alimentos e bebidas

Como já mencionado anteriormente, de todas as áreas de aplicação, alimentos e bebidas foi a mais popular entre os artigos levantados (31 artigos), sendo a maioria voltada para análise de leite (35%) e cachaça (23%). Na análise de alimentos, o uso de SDI tem sido explorado para classificação (SILVA NETO *et al.*, 2016) e na detecção de parâmetros de qualidade (SCHLESNER, *et al.*, 2022), adulterantes (SILVA & ROCHA, 2020) e contaminantes (FRANCO *et al.*, 2021). Todos os artigos levantados com aplicação na área de alimentos e bebidas estão apresentados na Tabela 1.

Em artigo publicado por Alves, Martins e Rocha (2023) uma nova abordagem foi apresentada para a determinação de lactose no leite, explorando a fotometria de imagem digital baseada em *smartphone*. O método foi baseado numa modificação do método de Benedict, envolvendo a formação do complexo violeta $\text{Cu(I)/2,2'-biquinolina-4,4'-dicarboxilato}$ na presença do açúcar redutor. O pré-tratamento da amostra e a reação de formação do cromóforo foram realizados em micro tubos para centrifuga com quantidades mínimas de reagentes. As medições foram baseadas no sistema de cores RGB, tomando o canal G como resposta analítica devido à complementaridade com a cor do complexo. Nas condições otimizadas, o procedimento proposto produziu uma resposta linear de até 20 mg L^{-1} ($r = 0,999$), com limite de detecção de $1,5 \text{ mg L}^{-1}$, o que é compatível com a determinação de lactose em leite e produtos lácteos categorizados com baixo teor de açúcar.

Böck *et al* (2022) utilizaram análise de imagens digitais por *smartphone* para quantificação de cobre em amostras de cachaça através da formação do complexo azul entre o cobre e a cuprizona. Diferentes procedimentos de aquisição de imagens e a influência do processamento da curva nos modos univariado e multivariado (PLS) foram avaliados. Os autores enfatizaram a necessidade de otimizar os parâmetros da aquisição de imagens, de acordo com o sistema utilizado, e concluíram que embora a reação colorimétrica tenha sido quantificada de forma univariada, o erro de predição foi menor quando utilizado o método multivariado, pois utiliza mais componentes de cores relacionados ao modelo. Os resultados obtidos em ensaios de recuperação foram equivalentes aos da espectrofotometria UV-Vis, utilizada como método de referência.

Maroubio e Melchert (2023) propuseram um procedimento para extração e pré-concentração de sulfonamidas totais de amostras de carne, associado a reação colorimétrica baseada na formação de um composto rosa (sal de imina) com medições de imagens digitais. As sulfonamidas são antimicrobianos sintéticos de baixo custo amplamente utilizados na medicina veterinária para tratar doenças e prevenir infecções. O método proposto provou ser uma alternativa mais fácil e rápida em comparação aos métodos convencionais, além de suficientemente preciso e exato. Foi observada resposta linear entre 33 e $233 \mu\text{g kg}^{-1}$ para sulfonamidas totais, limite de detecção em $10 \mu\text{g kg}^{-1}$ e valores de recuperação entre 71 e 100%. Além disso, o método foi apresentado como mais barato, seguro e ecológico que os métodos relatados anteriormente devido ao menor consumo de reagentes tóxicos. Para uma amostra de 750 mg de carne, foram gerados apenas 335 μL de resíduo.

Tabela 1. Levantamento bibliográfico sobre pesquisas realizadas no Brasil com o uso de imagens digitais baseadas em *smartphone* aplicadas a análise de alimentos e bebidas.

Referência	Analito	Amostra	Sinal analítico	Aplicativo
Acevedo <i>et al.</i> , 2018	surfactantes aniônicos	leite	R	Color Grab®
Almeida <i>et al.</i> , 2022	nitrito	salsicha	R	PhotoMetrix®
Alves; Martins e Rocha, 2023	lactose	leite	G	Color Grab®
Böck <i>et al.</i> , 2018	etanol	cachaça	histograma	PhotoMetrix®
Böck <i>et al.</i> , 2022	cobre	cachaça	histograma	PhotoMetrix®
Costa <i>et al.</i> , 2020	amido, H ₂ O ₂ e NaClO	leite	histograma	PhotoMetrix® / RedGIM®
de Carvalho e Nunes, 2021	clorofila e carotenoides	óleos vegetais	histograma	PhotoMetrix®
de Carvalho <i>et al.</i> , 2023	óleo de soja	azeite e óleo de abacate	histograma	Color Capture & Identifier
dos Santos, IC <i>et al.</i> , 2023	eugenol	óleo essencial	histograma	PhotoMetrix®
Franco; Suarez e dos Santos, 2017	furfural	cachaça	G	ImageJ
Franco <i>et al.</i> , 2017	metanol	cachaça	G	ImageJ
Franco <i>et al.</i> , 2021	cobre	cachaça	R	Color Grab®
Gonçalves, Soares e Rocha, 2023	proteína	leite, feijão e lentilha	G	PhotoMetrix®
Grazel <i>et al.</i> , 2016	identificação	extratos comerciais de taninos	histograma	PhotoMetrix®
Helfer <i>et al.</i> , 2018	estabilidade térmica (pH)	leite cru	histograma	PhotoMetrix PRO®
Lima <i>et al.</i> , 2020	H ₂ O ₂	leite	-log(G/G _b)	Color Grab®
Marinho <i>et al.</i> , 2019	etanol	cachaça e vodka	G	Color Grab®
Maroubo e Melchert, 2023	sulfonamidas	carne	G	Color Grab®
Martins <i>et al.</i> , 2021	compostos fenólicos	acerola	R	Color Grab®
Martins, Soares e Rocha, 2023	flavonois	frutas vermelhas	B	ImageJ®
Martins, Soares e Rocha, 2023	flavonois	frutas vermelhas	B	Color Grab®
Pessoa <i>et al.</i> , 2017	cobre	cachaça	-log(G/G _b)	ImageJ
Resende, Magalhães e Nunes, 2023	esteróis	óleos vegetais	-log(B/B _b)	Color Grab®
Santos, <i>et al.</i> , 2022	flavonóis	fruta	G	PhotoMetrix®
Schlesner, <i>et al.</i> , 2022	açúcar	refrigerante	histograma	PhotoMetrix UVC®
Silva Neto, Fonseca e Braga, 2016	classificação	águas minerais	histograma	Color Picker
Silva e Rocha, 2020	proteína	leite (adulteração)	R	Color Grab®
Silva, Gonçalves e Rocha, 2021	formaldeído	leite	G _b - G	Color Grab®
Soares; Campos <i>et al.</i> , 2020	ésteres	cachaça	B	PhotoMetrix®
Soares, Donati e Rocha, 2022	H ₂ O ₂	leite	histograma	PhotoMetrix® / ColorMine
Vianna <i>et al.</i> , 2022	sulfonamidas	leite de vaca	G	Color Grab®

• Amostras ambientais

A aplicação em análise de amostras ambientais abrangeu 19% dos artigos levantados em nossa pesquisa bibliográfica. O uso das SDI é atraente para análises ambientais, principalmente em medições de campo, devido à sua portabilidade e baixa demanda energética. Todos os artigos levantados com aplicação em amostras ambientais estão apresentados na Tabela 2.

A determinação da demanda química de oxigênio (DQO) desempenha um papel importante na medição da poluição da água, mas normalmente tem um preço ecológico elevado. Talvez por isso, dos 12 artigos levantados com aplicação na área ambiental, 5 tinham foco na determinação da DQO. Em artigo publicado por von Mühlen *et al.* (2022), o aplicativo PhotoMetrix PRO® foi utilizado para aquisição de imagens digitais e análise multivariada para medidas de DQO em amostras de água. A análise estatística não mostrou diferença significativa nos resultados em relação ao método de referência, ainda com a vantagem da redução do volume de reagentes, do custo da análise e da geração de resíduos.



Já de Castro e colaboradores (2023), com objetivo de verificar a aplicabilidade no tratamento eletroquímico de águas residuais, propuseram um método para determinação da DQO com o uso de SDI, usando o modelo de cores HSV e o aplicativo Color Grab®. O método foi avaliado sob diferentes condições e obteve bons resultados não apenas em soluções aquosas de ácido oxálico, mas também em amostras reais de águas residuais. A aplicação foi estatisticamente precisa quando matrizes reais de água foram utilizadas para determinar os valores de DQO, e quando o decaimento da DQO foi monitorado durante um tratamento eletroquímico de um efluente.

A concentração residual de cloro livre é um parâmetro importante para avaliar a potabilidade da água e a eficiência da desinfecção no sistema de tratamento de água. Como é necessária uma faixa restrita de concentração de cloro livre residual em todos os pontos da rede de distribuição para garantir a eficiência e evitar efeitos deletérios, a quantificação rápida e *in situ* desta espécie é importante. Nascimento *et al.* (2023) propuseram dois procedimentos baseados em DPD (N,N-dietil-p-fenilenodiamina) e OT (orto-tolidina, 3,3-dimetilbenzidina) para determinação de cloro livre residual em água através da exploração de um microdispositivo baseado em fluxo construído com tecnologia de cerâmica co-queimada de baixa temperatura (LTCC). O sinal analítico foi monitorado pela câmera de um *smartphone* através de valores de RGB obtidos pelo aplicativo Color Grab®. Sob condições otimizadas, faixas lineares entre 0,6 e 2,5 mg L⁻¹ e 0,1 e 2,3 mg L⁻¹ foram obtidas para os métodos DPD e OT, com limites de detecção e quantificação de 0,023 e 0,077 mg L⁻¹ (DPD) e 0,026 e 0,089 mg L⁻¹ (OT) Ambos os procedimentos foram aplicados com sucesso na análise de amostras de uma estação de tratamento de água. O microdispositivo baseado em fluxo acoplado à colorimetria de imagem digital foi considerado uma ferramenta analítica inovadora, sustentável e econômica para análises químicas em campo.

Tabela 2. Levantamento bibliográfico sobre pesquisas realizadas no Brasil com o uso de imagens digitais baseadas em *smartphone* aplicadas a análise de amostras ambientais.

Referência	Analito	Amostra	Sinal analítico	Aplicativo
Adamo; Junger e de Jesus, 2021	ferro	água	M	Corel Photo-Paint X8
Baumann <i>et al.</i> , 2019	fluoreto	água	histograma	PhotoMetrix®
Cardozo, <i>et al.</i> , 2023	cor e DQO	águas residuais	S	Color Grab®
de Castro, <i>et al.</i> , 2023	DQO	águas residuais	S	Color Grab®
dos Santos, KNO e Mamián-López, MB, 2023	(sensor colorimétrico para) H ₂ O ₂	amostras ambientais	histograma	PhotoMetrix®
Lima; Nascimento e Rocha 2017	surfactantes aniônicos	águas doces	histograma	Color Grab®
Lumbaue <i>et al.</i> , 2019	Fe II / H ₂ O ₂	processo foto-fenton	histograma	PhotoMetrix PRO®
Nascimento <i>et al.</i> , 2023	cloro livre	água potável	G / B	Color Grab®
Pappis <i>et al.</i> , 2019	fluoreto e fósforo	água potável	raiz(R ² +G ² +B ²)	PhotoMetrix®
Radtke, Martins e Machado, 2019	DQO	efluentes	G	ImageJ® e PhotoMetrix®
Segundo, <i>et al.</i> , 2023	DQO (faixa baixa)	amostras sintéticas	S	Color Grab®
Von Mühlen <i>et al.</i> , 2022	DQO	água	histograma	PhotoMetrix®

• Combustíveis e biocombustíveis

Dos 8 artigos encontrados com aplicação das SDI na análise de combustíveis, apresentados na Tabela 3, 6 eram voltados para o controle da qualidade do biodiesel e sua quantificação na mistura com o diesel e foram publicados pela pesquisadora Samara Soares e seus colaboradores. Samara é pesquisadora do Centro de Energia Nuclear na Agricultura da Universidade de São Paulo e também foi autora de um dos artigos de revisão apresentados acima.



Soares e seus colaboradores (2022) desenvolveram um procedimento microanalítico usando colorimetria de SDI para determinar as concentrações de cálcio e magnésio em biodiesel sem extração de analito. O método analítico foi baseado na descoloração de uma solução alcalina de preto de eriocromo T (EBT) devido à formação de complexos com os analitos. As medidas fotométricas foram baseadas no sistema de cores RGB, tomando os valores do canal R como sinal analítico devido à complementaridade com a cor da solução EBT. O coeficiente de variação ($n = 10$) e o limite de detecção foram 1,0% e $3 \mu\text{mol L}^{-1}$, respectivamente. Foi observada resposta linear na faixa de 10 a $75 \mu\text{mol L}^{-1}$ ($r = 0,999$). As quantidades de reagentes consumidas por determinação foram de apenas 25 μg de EBT e 120 μg de NaOH, com geração de apenas 935 μL de resíduos. O procedimento foi seletivo para cálcio e magnésio e os efeitos de matriz para o biodiesel obtido a partir de diferentes matérias-primas foram insignificantes, com recuperações de 90 a 104%, com resultados estatisticamente equivalentes aos obtidos pelo método de referência.

Com o objetivo de determinar o teor de biodiesel em mistura com diesel, Soares e colaboradores (2023) desenvolveram um dispositivo microfluídico associado a derivatização química de ésteres alquílicos e a detecção por colorimetria de SDI. Os analitos reagiram com hidroxilamina alcalina produzindo os hidroxamatos de alquil correspondentes, medidos como complexos coloridos de Fe (III). A resposta analítica foi baseada na medição do canal G (verde) do sistema de cores RGB. Tomando linoleato de metila como composto modelo, foi obtida uma resposta linear de 0,1% a 0,6% (v/v) ($r = 0,999$), coeficiente de variação ($n = 10$) de 4,0% e limite de detecção de 0,04% (v/v). O procedimento consome 1,2 μL de amostra, 230 μg de hidroxilamina, 480 μg de NaOH, 14 μg de Fe (III) e o equivalente a 1,2 μL de HNO_3 69% (v/v). Resultados precisos foram alcançados em relação ao método de referência baseado em espectroscopia de infravermelho, com concordância no nível de confiança de 95%.

Tabela 3. Levantamento bibliográfico sobre pesquisas realizadas no Brasil com o uso de imagens digitais baseadas em *smartphone* aplicadas a análise de combustíveis e biocombustíveis.

Referência	Analito	Amostra	Sinal analítico	Aplicativo
Holkem <i>et al.</i> , 2021	sal	óleo cru	histograma	PhotoMetrix UVC®
João <i>et al.</i> , 2019	Fe III	bioetanol	$\text{raiz}[(R-R_b)^2 + (G-G_b)^2 + (B-B_b)^2]$	Color Grab®
Soares, Lima e Rocha, 2017	iodo	biodiesel	R	PhotoMetrix®
Soares e Rocha, 2019	metanol	biodiesel	G	PhotoMetrix®
Soares <i>et al.</i> , 2019	metanol	biodiesel	G	PhotoMetrix®
Soares; Nunes <i>et al.</i> , 2020	biodiesel	diesel	G	PhotoMetrix®
Soares <i>et al.</i> , 2022	Ca e Mg	biodiesel	R	PhotoMetrix®
Soares <i>et al.</i> , 2023	biodiesel	diesel	G	ImageJ®

• Fármacos e fluidos biológicos

O controle de qualidade dos medicamentos visa garantir que os produtos que serão distribuídos apresentem-se dentro das especificações estabelecidas e, portanto, cumpram a finalidade pretendida. Já as análises clínicas fornecem informações vitais sobre a saúde de um paciente, permitindo aos médicos identificar e tratar uma variedade de condições e doenças. Os 7 artigos encontrados com aplicação das SDI na análise de fármacos e fluidos biológicos estão apresentados na Tabela 4.

Fernandes e colaboradores (2023) apresentaram a titulação fotométrica com o uso de SDI como uma alternativa viável e promissora para determinação de vitamina C em comprimidos. O método proposto utilizou pequenos volumes de reagentes, possibilitou maior rapidez nas análises e eliminou erros sistemáticos inerentes às técnicas de volumetria clássica. Além disso, quando comparada com as titulações espectrofotométricas, incluía ainda as vantagens de tornar o método mais simples e barato, além de não necessitar de uma bomba peristáltica para aspiração das soluções. O procedimento de titulação fotométrica proposto era baseado na decomposição do complexo vermelho $[\text{Fe}(\text{SCN})]^{2+}$ pela redução com o ácido ascórbico, usado como titulante. O método foi aplicado à determinação do teor de vitamina C em comprimidos de 500 mg e os resultados foram comparados com o método iodométrico de referência. Os melhores resultados foram obtidos com o parâmetro G, do sistema de cores RGB: desvio padrão relativo de 4,4% e recuperação em relação ao método de referência igual a 95,8%. Além disso, os resultados foram considerados equivalentes a um nível de 95% de confiança, tanto para variância quanto para média e comparáveis aos apresentados na literatura.

Em estudo publicado por Soares e Rocha (2021) foi desenvolvida uma abordagem simples e econômica para a determinação de ácido úrico na saliva, combinando um teste pontual com colorimetria de SDI. Baseou-se na redução de Cu (II) a Cu (I) pelo ácido úrico, seguida da complexação com ácido 2,2'-biquinolina-4,4'-dicarboxílico, resultando em um produto violeta. Uma câmera de *smartphone* e o aplicativo PhotoMetrix® foram utilizados para capturar a imagem e convertê-la para valores RGB. As medidas fotométricas foram baseadas na radiação refletida no canal G, correspondente à cor complementar do produto, obtendo uma resposta linear entre 25 e 150 $\mu\text{mol L}^{-1}$. O coeficiente de variação ($n = 10$) e o limite de detecção foram 1,4 % e 8 $\mu\text{mol L}^{-1}$, respectivamente. Tanto o consumo de reagentes quanto o volume de resíduos foram minimizados. Os resultados concordaram com os obtidos pela cromatografia líquida de alta eficiência, demonstrando que a abordagem é uma alternativa confiável para análises clínicas em larga escala.

Tabela 4. Levantamento bibliográfico sobre pesquisas realizadas no Brasil com o uso de imagens digitais baseadas em *smartphone* aplicadas a análise de fármacos e fluidos biológicos.

Referência	Analito	Amostra	Sinal analítico	Aplicativo
Coutinho <i>et al.</i> , 2017	vitamina C	comprimidos	$[-\log(\text{G}/\text{G}_b)] - [-\log(\text{B}/\text{B}_b)]$	GIMP 2.0
de Camargo <i>et al.</i> , 2017	proteína	sangue humano	$-\log(\text{H}/\text{H}_b)$	doméstico
dos Santos, SDC <i>et al.</i> , 2021	ferro	comprimidos	G	Color Grab®
Fernandes, <i>et al.</i> , 2023	vitamina C	comprimidos	G	PhotoMetrix®
Oliveira <i>et al.</i> , 2016	diagnóstico de dengue	sangue humano	histograma	Image Processing Toolbox
Ravazzia <i>et al.</i> , 2018	captopril	medicamento e urina sintética	$-\log(\text{B}/\text{B}_b)$	ImageJ
Soares e Rocha, 2021	ácido úrico	saliva	G	PhotoMetrix®

• Análise Forense

A química forense tem como objetivo analisar, classificar e identificar os elementos ou substâncias encontradas nos locais dos crimes ou relacionadas a estes, produzindo provas físicas e materiais para a justiça. Das substâncias frequentemente estudadas por este ramo das ciências forenses estão as drogas lícitas e ilícitas, venenos, acelerantes e resíduos de incêndio, explosivos, resíduos de disparo de armas de fogo, combustíveis, tintas e fibras. Os artigos encontrados nessa área de aplicação estão apresentados na Tabela 5.



Costa *et al.* (2022) propuseram a utilização de um microscópio portátil combinado com um *smartphone* e o aplicativo PhotoMetrix® para avaliar a autenticidade de cédulas brasileiras (R\$50 e R\$100) e carteiras nacionais de habilitação (CNH) por meio de aquisição de imagens e análise dos componentes principais. Foram analisadas várias regiões, tanto das notas quanto das CNHs, utilizando os canais vermelho (R), verde (G), azul (B), matiz (H), saturação (S), valor (V), luminosidade (L) e intensidade (I). Excelentes resultados foram obtidos na diferenciação das notas e CNHs, tanto por análises visuais quanto quimiométricas (PCA). Os autores concluíram que a abordagem estudada pode ser uma ferramenta forense portátil, rápida, robusta, de baixo custo e confiável para a determinação da autenticidades de cédulas de documentos.

O estudo publicado por Gorziza *et al.* (2020) teve como objetivo avaliar a capacidade do PhotoMetrix PRO® na diferenciação de canetas esferográficas azuis. Foram realizados experimentos com diferentes canetas esferográficas, incluindo canetas coloridas como controle de funcionalidade do aplicativo. Os resultados mostraram diferenciação adequada entre canetas esferográficas coloridas, e houve tendência satisfatória de separação para diferentes marcas de canetas esferográficas azuis, mais utilizadas no Brasil. No entanto, os autores recomendaram novos estudos para avaliar a influência da pressão da escrita na coleta de dados e na idade das tintas, bem como na qualidade das diferentes câmeras dos celulares para que essa nova tecnologia possa ser aplicada na prática da documentoscopia forense.

Tabela 5. Levantamento bibliográfico sobre pesquisas realizadas no Brasil com o uso de imagens digitais baseadas em *smartphone* aplicadas a análise de amostras forenses.

Referência	Analito	Amostra	Sinal analítico	Aplicativo
Costa <i>et al.</i> , 2022	autenticidade	cédulas e documentos	histograma	PhotoMetrix®
Gorziza <i>et al.</i> , 2020	diferenciação	tinta de caneta azul	histograma	PhotoMetrix®
Salles, <i>et al.</i> , 2013	discriminação	explosivos	histograma	doméstico
Tosato <i>et al.</i> , 2016	cocaína e adulterantes	amostras ilícitas	histograma	doméstico
Vittorazzi <i>et al.</i> , 2020	classificação	cédulas brasileiras	histograma	PhotoMetrix®

CONCLUSÃO

A portabilidade e a popularidade dos *smartphones*, com câmeras cada vez mais potentes, e o surgimento de aplicativos cada vez mais completos oferecem oportunidades atuais para o desenvolvimento de métodos analíticos baseados na fotometria de imagens digitais. Tais métodos seriam rápidos e de baixo custo, com possibilidade para análises qualitativas e quantitativas em diferentes áreas de aplicação. Esta revisão mostrou que os pesquisadores brasileiros estão investindo nas SDI como ferramenta analítica, apontando as tendências atuais, e como isso pode impactar a acessibilidade dos métodos analíticos e sua sustentabilidade. Apesar de sua importância, pesquisas ainda precisam ser feitas sobre os efeitos dos parâmetros que afetam a aquisição confiável de imagens para garantir a reprodução dos procedimentos analíticos. Uma vez que os procedimentos estejam padronizados e suas variáveis sob controle, as metodologias poderão ser adotadas de maneira democrática por pequenos ou grandes laboratórios, em aplicações que podem ir do controle da qualidade na indústria a análises de campo em locais remotos.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao IFRJ *campus* Nilópolis pelo financiamento da pesquisa e a todos os alunos de iniciação científica envolvidos no projeto.



INSTITUTO FEDERAL DE
EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
RIO DE JANEIRO



Perspectivas da
Ciência e
Tecnologia

REFERÊNCIAS

- ABU-SAMRA, A; Morris, JS; KOIRTYOHANN, SR. Wet ashing of some biological samples in a microwave oven. **Anal Chem** **47**(8), 1475-7, 1975.
- ACEVEDO, MSMSF *et al.* A green and cost-effective procedure for determination of anionic surfactants in milk with liquid-liquid microextraction and smartphone-based photometric detection. **Microchemical Journal** **143**, 259-263, 2018.
- ADAMOA, CB; JUNGGERA, AS, DE JESUS, DP. Application of water beads as a novel and simple sorbent for smartphone-based colorimetric determination of iron in water. **Quim. Nova** **44** (10), 1360-1363, 2021.
- ALMEIDA, GA. *et al.* An Alternative and Fast Method of Nitrite Determination in Meat Sausages Using the PhotoMetrix® Smartphone Applicative for Digitized Image Processing. **Open Access Library Journal** **9**, e8689, 2022.
- ALVES, RCM.; MARTINS, LC, ROCHA, FRP. A novel approach for lactose determination in cow's milk exploiting smartphone-based digital image photometry. **Anal. Methods** **15**, 4964, 2023.
- ARAÚJO, WR, PAIXÃO TRLC. Fabrication of disposable electrochemical devices using silver ink and office paper. **Analyst** **139**, 2742, 2014.
- ARMENTA, S.; GARRIGUES, S., DE LA GUARDIA, M. Green Analytical Chemistry. **Trends in Analytical Chemistry** **27** (6), 2008.
- ARMENTA, S; DE LA GUARDIA, M.; ESTEVE-TURRILLAS, FA. Hard Cap Espresso Machines in Analytical Chemistry: What Else? **Anal Chem.** **88**(12), 6570-6, 2016.
- BAUMANN, L. *et al.* Uso do aplicativo PhotoMetrix no monitoramento da concentração de flúor em sistemas alternativos de abastecimento de água. **Águas Subterrâneas - Seção Estudos de Caso e Notas Técnicas**, 2019.
- BENEDETTI *et al.* A digital image analysis method for quantification of sulfite in beverages. **Analytical Methods** **18**, 2015.
- BERGQUIST, J., TURNER, C. Analytical chemistry for a sustainable society – trends and implications. **Analytical and Bioanalytical Chemistry** **410**, 3235–3237, 2018.
- BÖCK, FC. *et al.* Rapid Determination of Ethanol in Sugarcane Spirit Using Partial Least Squares Regression Embedded in Smartphone. **Food Anal. Methods** **11**, 1951–1957, 2018.
- BÖCK, FC. *et al.* PhotoMetrix and colorimetric image analysis using smartphones. **Journal of Chemometrics** **34** (12), e325, 2020.
- BÖCK, FC. *et al.* Low cost method for copper determination in sugarcane spirits using Photometrix UVC® embedded in smartphone. **Food Chemistry** **367**, 130669, 2022.
- CARDOZO, JC. Decentralized environmental applications of a smartphone-based method for chemical oxygen demand and color analysis. **Scientific Reports** **13**, 11082, 2023.
- CHEMAT, F.; GARRIGUES, S. and DE LA GUARDIA, M. Portability in analytical chemistry: a green and democratic way for sustainability. **Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry** **19**, 94–98, 2019.
- CHOODUM *et al.* Real time quantitative colourimetric test for methamphetamine detection using digital and mobile phone technology. **Forensic Science International** **235**, 8–13, 2014.
- CNI. Portal da Indústria. **Entenda a economia do Brasil, seu contexto, atualidades e perspectiva**. Brasília, 2023. Disponível em: <https://www.portaldaindustria.com.br/industria-de-a-z/economia/>. Acessado em 03 de junho de 2024.
- COLZANI, H *et al.* Determinação de Manganês em Pilhas Utilizando um Scanner. **Rev. Virtual Quim.** **9** (4), 1672-1685, 2017.
- COSTA, RA. *et al.* Quantification of milk adulterants (starch, H₂O₂, and NaClO) using colorimetric assays coupled to smartphone image analysis. **Microchemical Journal** **156**, 104968, 2020.
- COSTA, RA. *et al.* Use of a Portable Microscope Combined with a Smartphone to Determine the Authenticity of Brazilian Banknotes and National Driver's Licenses. **J. Braz. Chem. Soc.** **33** (5), 437-445, 2022.
- COUTINHO, MS. *et al.* Colorimetric Determination of Ascorbic Acid Based on Its Interfering Effect in the Enzymatic Analysis of Glucose: An Approach Using Smartphone Image Analysis. **J. Braz. Chem. Soc.** **28** (12), 2500-2505, 2017.
- DA COSTA, AB. *et al.* PhotoMetrix UVC: A New Smartphone-Based Device for Digital Image Colorimetric Analysis Using PLS Regression. **J. Braz. Chem. Soc.** **32** (3), 675-683, 2021.
- DA SILVA, RS, BORGES, EM. Quantitative Analysis Using a Flatbed Scanner: Aspirin Quantification in Pharmaceutical Tablets. **J. Chem. Educ.** **96**, 1519–1526, 2019.



INSTITUTO FEDERAL DE
EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
RIO DE JANEIRO



Perspectivas da
Ciência e
Tecnologia

- DA SILVA, GO; ARAUJO, WR, PAIXÃO, TRLC. Portable and low-cost colorimetric office paper-based device for phenacetin detection in seized cocaine samples. **Talanta** **176**, 674–678, 2018.
- DE CAMARGO, CL *et al.* Smartphone for Point-of-Care Quantification of Protein by Bradford Assay. **J. Braz. Chem. Soc.** **28** (4), 689-693, 2017.
- DE CARVALHO, TCL., NUNES, CA. Smartphone-based method for the determination of chlorophyll and carotenoid contents in olive and avocado oils: An approach with calibration transfer. **Journal of Food Composition and Analysis** **104**, 104164, 2021.
- DE CARVALHO, IM *et al.* Exploring Strategies to Mitigate the Lightness Effect on the Prediction of Soybean Oil Content in Blends of Olive and Avocado Oil Using Smartphone Digital Image Colorimetry. **Foods** **12**, 3436, 2023.
- DE CASTRO, CM *et al.* Environmental application of a cost-effective smartphone-based method for COD analysis: Applicability in the electrochemical treatment of real wastewater. **Science of the Total Environment** **855**, 158816, 2023.
- DEEPAK, B. Evolution & Importance of Analytical Chemistry. **Lab-training.com**. Publicado em 25 de março de 2012. Disponível em: <https://lab-training.com/evolution-importance-of-analytical-chemistry/>. Acessado em 16 de novembro de 2021.
- DEEPAK, B. Contributions of Analytical Chemistry. **Lab-training.com**. Publicado em 2 de junho de 2017. Disponível em: <https://lab-training.com/contributions-analytical-chemistry/>. Acessado em 16 de novembro de 2021.
- DE LA GUARDIA, M., GARRIGUES, S. Analytical Research Based on the Use of Low Cost Instrumentation. **Pharmaceutical Sciences** **25**, 82-84, 2019.
- DESTINO, JF, CUNNINGHAM, K. At-Home Colorimetric and Absorbance-Based Analyses: An Opportunity for Inquiry-Based, Laboratory-Style Learning. **Journal of Chemical Education**. **97** (9), 2960-2966, 2020.
- DOS SANTOS IC *et al.* Smartphone-based rapid and low-cost method for the determination of eugenol content of clove essential oil. **Ciência Rural** **53**(10), e20220498, 2023.
- DOS SANTOS, KNO e MAMIÁN-LÓPEZ, MB Exploring visible light enhancement for sensing: an azo-dye decorated gold nanoantenna monitored with a smartphone app. **Analytical and Bioanalytical Chemistry** **415**, 4459–4466, 2023.
- DOS SANTOS, SDC *et al.* Determinação colorimétrica do teor de ferro em formulações farmacêuticas utilizando a câmera de um *smartphone* associada a aplicativos de medição de cores. **Revista Eletrônica Perspectivas da Ciência e Tecnologia** **13**, 197-207, 2021.
- ESPINOLA, A.; PINTO, MAS, NETO, CC. Fritz Feigl: The centennial of a researcher, **Bull. Hist. Chem.** **1718**, 31–39, 1995. Disponível em: http://acshist.scs.illinois.edu/bulletin_open_access/bull95-num17-18.php. Acessado em 16 de novembro de 2021.
- FAN, Y *et al.* Digital image colorimetry on smartphone for chemical analysis: A review. **Measurement** **171**, 2021.
- FABRIS, BT; JOÃO, JJ, BORGES, EM. Quantificação de Nitrito em Água Utilizando um Scanner de Mesa. **Rev. Virtual Quim.** **12** (3), 569-582, 2020.
- FERNANDES *et al.* Uso de imagens digitais baseadas em smartphones para monitorar titulações fotométricas na determinação de vitamina C em comprimidos. **Revista Eletrônica Perspectivas da Ciência e Tecnologia** **15**, 1-16, 2023.
- FIRDAUS, MF *et al.* Determination of Chromium and Iron Using Digital Image-based Colorimetry. **Procedia Environmental Sciences** **20**, 298 – 304, 2014.
- FRANCO, MOK *et al.* Smartphone Application for Methanol Determination in Sugar Cane Spirits Employing Digital Image-Based Method. **Food Anal. Methods** **10**, 2102–2109, 2017.
- FRANCO, MOK; SUAREZ, WT, SANTOS, VB. Digital Image Method Smartphone-Based for Furfural Determination in Sugarcane Spirits. **Food Anal. Methods** **10**, 508–515, 2017.
- FRANCO, MOK *et al.* Microanalysis based on paper device functionalized with cuprizone to determine Cu²⁺ in sugar cane spirits using a smartphone. **Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy** **25**, 119580, 2021.
- GALUSZKA, A; MIGASZEWSKI, Z, NAMIESNIK, J. The 12 principles of green analytical chemistry and the SIGNIFICANCE mnemonic of green analytical practices, **Trends in Analytical Chemistry** **50**, 78–84, 2013.
- GONÇALVES, TR *et al.* Evaluation of Brazilian Monovarietal Extra Virgin Olive Oils Using Digital Images and Independent Component Analysis. **J. Braz. Chem. Soc.** **31** (9), 1955-1963, 2020.
- GONÇALVES, IC; SOARES, S, ROCHA, FRP. Exploiting microdistillation and smartphone-based digital-image colorimetry for determination of protein in foods. **Microchemical Journal** **188**, 108461, 2023.

- GORZIZA, RP *et al.* Blue Ballpoint Pen Inks Differentiation using Multivariate Image Analysis of Digital Images Captured with PhotoMetrix PRO®. **Brazilian Journal of Forensic Sciences, Medical Law and Bioethics** 9(3), 331-355, 2020.
- GRASEL, FS *et al.* Principal Component Analysis of Commercial Tannin Extracts Using Digital Images on Mobile Devices. **J. Braz. Chem. Soc.** 27 (12), 2372-2377, 2016.
- HELPER, GA *et al.* PhotoMetrix: An Application for Univariate Calibration and Principal Components Analysis Using Colorimetry on Mobile Devices. **J. Braz. Chem. Soc.** 28 (2), 328-335, 2017.
- HELPER, GA *et al.* A New Tool for Interpretation of Thermal Stability of Raw Milk by Means of the Alizarol Test Using a PLS Model on a Mobile Device. **Food Anal. Methods** 11, 2022–2028, 2018.
- HELPER, GA. **Photometrix**. Free mobile chemometric tool. Disponível em <https://www.photometrix.com.br/#gal>. Acessado em 13 de junho de 2024.
- HOLKEM, AP *et al.* A green and high throughput method for salt determination in crude oil using digital image-based colorimetry in a portable device. **Fuel** 289, 119941, 2021.
- JARUJAMRUS, P *et al.* Use of a Smartphone as a Colorimetric Analyzer in Paper-based Devices for Sensitive and Selective Determination of Mercury in Water Samples. **Analytical Science** 34(1), 75-81, 2018.
- JOÃO, AF *et al.* Iron (III) determination in bioethanol fuel using a smartphone-based device. **Microchemical Journal** 146, 1134–1139, 2019.
- KALINOWSKA, K; WOJNOWSKI, W, TOBISZEWSKI, M. Smartphones as tools for equitable food quality assessment. **Trends in Food Science & Technology** 111, 271–279, 2021.
- KOEL M. Do we need green analytical chemistry? **Green Chemistry** 18, 923–931, 2016.
- KUNTZLEMAN, TS, JACOBSON, EC. Teaching Beer's Law and Absorption Spectrophotometry with a Smart Phone: A Substantially Simplified Protocol. **J. Chem. Educ.** 93, 1249–1252, 2016.
- LIMA, MJA; NASCIMENTO, CF, ROCHA, FRP. Feasible photometric measurements in liquid–liquid extraction by exploiting smartphone-based digital images. **Anal. Methods** 9, 2220, 2017.
- LIMA, MJA *et al.* Spot test for fast determination of hydrogen peroxide as a milk adulterant by smartphone-based digital image colorimetry. **Microchemical Journal** 157, 105042, 2020.
- LOURENÇO EC *et al.* Determinação do Teor de Ferro Utilizando o Aplicativo PhotoMetrix PRO®: a Tecnologia a favor do Ensino de Química. **Rev. Virtual Quim.** 13 (1), 2020.
- LUMBAQUE, EC *et al.* Total dissolved iron and hydrogen peroxide determination using the PhotoMetrixPRO application: A portable colorimetric analysis tool for controlling important conditions in the solar photo-Fenton process. **Journal of Hazardous Materials** 378, 120740, 2019.
- MARCINKOWSKA, R; NAMIESNIK, J, TOBISZEWSKI, M. Green and equitable analytical chemistry. **Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry** 19, 19–23, 2019.
- MARINHO, OR *et al.* A greener, fast, and cost-effective smartphone-based digital image procedure for quantification of ethanol in distilled beverages. **Microchemical Journal** 147, 437–443, 2019.
- MAROUBO, LA, MELCHERT, WR. Development of an Environmentally Friendly Extraction Method Using Smartphone-Based Digital Images for the Determination of Total Sulfonamides in Meat Samples. **J. Braz. Chem. Soc.** 34 (6), 846-856, 2023.
- MARTINEZ, A.W.; PHILLIPS, S.T.; BUTTE, M.J., WHITESIDES, G.M. Patterned paper as a platform for inexpensive, low-volume, portable bioassays, **Angew. Chem. Int. Ed. Engl.** 46, 1318–1320, 2007.
- MARTINS, LC *et al.* A Greener and Faster Approach for Determination of Phenolic Compounds by Smartphone-Based Colorimetry. **Proceedings** 70 (20), 2021.
- MARTINS, LC; SOARES, ROCHA, FRP. Digital-image eco-friendly spot test with liquid–liquid microextraction for selective determination of flavonols in berries. **Microchemical Journal** 193, 109207, 2023.
- MARTINS, LC; SOARES, S, ROCHA, FRP. Digital-image photometry and salting-out assisted liquid-liquid microextraction for determination of flavonols in berries. **Journal of Food Composition and Analysis** 123, 105515, 2023.
- NASCIMENTO, MCGM *et al.* Flow-based green ceramics microdevice with smartphone image colorimetric detection for free chlorine determination in drinking water. **Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy** 287, 122096, 2023.

- OLIVEIRA, KA *et al.* Dengue diagnosis on laser printed microzones using smartphone based detection and multivariate image analysis. **Analytical Methods** **35**, 2016.
- PAIXÃO, TRLC. Turning Paper and other low-cost materials into analytical sensor devices for in-field. **8º Webinar BrJAC** Prof. Thiago Paixão. YouTube. 28 de junho de 2021. Disponível em: <https://youtu.be/8FqTlfAdNcc?si=VyM6pERdWUKdUgGV>.
- PAPPIS, C *et al.* Point-of-use Determination of Fluoride and Phosphorus in Water through a Smartphone using the PhotoMetrix® App. **Br. J. Anal. Chem.** **6** (25), 58-66, 2019.
- PESSOA, KD *et al.* A digital imagemethod of spot tests for determination of copper in sugar cane spirits. **Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy** **185**, 310–316, 2017.
- PLACIDO, KM. **Avaliação do uso de imagens digitais obtidas por smartphones para determinação de amônia total em águas.** Monografia apresentada ao IQ/UnB, como requisito parcial ao programa de graduação em Química Tecnológica, para obtenção do título de Bacharel em Química Tecnológica. Brasília, julho de 2017.
- RADTKE, JF; MARTINS, JS, MACHADO, EL. Determinação da demanda química de oxigênio (dco) em efluentes a partir da aquisição de imagens digitais utilizando *smartphone*. **Revista Jovens Pesquisadores** **9** (1), 21-34, 2019.
- RAVAZZI, CG. Smartphone application for captopril determination in dosage forms and synthetic urine employing digital Imaging. **Talanta** **189**, 339–344, 2018.
- RESENDE, LMB; MAGALHÃES, EJ, NUNES, CA. Optimization and validation of a smartphone-based method for the determination of total sterols in selected vegetable oils by digital image colorimetry. **Journal of Food Composition and Analysis** **117**, 105111, 2023.
- ROSA, TR *et al.* RedGIM como aplicativo de smartphone para aplicações quimiométricas por meio de análise de imagens: um uso em PLS. **Quim. Nova** **45** (5), 550-559, 2022.
- SALLES, MO *et al.* Explosive colorimetric discrimination using a smartphone, paper device and chemometrical approach. **Anal. Methods** **6**, 2047-2052, 2014.
- SANTOS, LM *et al.* An Alternative Tool for Determining Flavonoid Compounds in *Markhamia tomentosa* and *Bunchosia glandulifera* Using Digital Image Analysis. **Open Journal of Applied Sciences** **12**, 714-722, 2022.
- SCHLESNER, SK, *et al.* Smartphone-based miniaturized, green and rapid methods for the colorimetric determination of sugar in soft drinks. **Green Analytical Chemistry** **1**, 100003, 2022.
- SEGUNDO, IDB *et al.* Cost-effective smartphone-based method for low range Chemical oxygen demand analysis. **MethodsX** **11** 102300, 2023.
- SILVA, AFS, ROCHA, FRP. A novel approach to detect milk adulteration based on the determination of protein content by smartphone-based digital image colorimetry. **Food Control** **115**, 107299, 2020.
- SILVA, AFS; GONÇALVES, IC, ROCHA, FRP. Smartphone-based digital images as a novel approach to determine formaldehyde as a milk adulterant. **Food Control** **125**, 107956, 2021.
- SILVA NETO, GF; FONSECA, A, BRAGA, JWB. Classificação de águas minerais baseada em imagens digitais obtidas por smartphones. **Quim. Nova** **39** (7), 876-881, 2016.
- SOARES, S; LIMA, MJA, ROCHA, FRP. A spot test for iodine value determination in biodiesel based on digital images exploiting a smartphone. **Microchemical Journal** **133**, 195–199, 2017.
- SOARES, S, ROCHA, FRP. A simple and low-cost approach for microdistillation: Application to methanol determination in biodiesel exploiting smartphone-based digital images. **Talanta** **199**, 285–289, 2019.
- SOARES, S *et al.* A novel spot test based on digital images for determination of methanol in biodiesel. **Talanta** **195**, 229–235, 2019.
- SOARES, S; CAMPOS, KRR *et al.* A spot test for total esters determination in sugarcane spirits exploiting smartphone-based digital images. **Analytical Methods** **31**, 2020.
- SOARES, S; NUNES, LC *et al.* Spot test exploiting smartphone-based digital images for determination of biodiesel in diesel blends. **Microchemical Journal** **152**, 104273, 2020.
- SOARES, S, ROCHA, FRP. Spot test for determination of uric acid in saliva by smartphone-based digital images: A new proposal for detecting kidney dysfunctions. **Microchemical Journal** **162**, 105862, 2021.

- SOARES, S; DONATI, GL, ROCHA, FRP. Digital-image photometry with multi-energy calibration. **Microchemical Journal** **182**, 107938, 2022.
- SOARES, S *et al.* Single-phase determination of calcium and magnesium in biodiesel using smartphone-based digital images. **Fuel** **307**, 121837, 2022.
- SOARES, S *et al.* A cost-effective microfluidic device for determination of biodiesel content in diesel blends. **Sensors & Actuators: B. Chemical** **390**, 134033, 2023.
- SOARES, S; FERNANDES, GM e ROCHA, FRP. Smartphone-based digital images in analytical chemistry: Why, when, and how to use. **Trends in Analytical Chemistry** **168**, 117284, 2023.
- TOSATO, F *et al.* Direct quantitative analysis of cocaine by thin layer chromatography plus a mobile phone and multivariate calibration: a cost-effective and rapid method. **Analytical Methods** **42**, 2016.
- VIANNA, VLF *et al.* Preconcentration of sulphonamides in bovine milk by the cloud point extraction method using smartphone-based digital images. **Analytical Methods** **11**, 2022.
- VIDAL, MF. Produção e uso de biocombustíveis no Brasil. **Caderno Setorial ETENE/BNB**. Ano 6, nº 184. Agosto, 2021. Disponível em https://www.bnb.gov.br/s482-dspace/bitstream/123456789/914/1/2021_CDS_184.pdf. Acessado em 03 de junho de 2024.
- VITTORAZZI, VB *et al.* Classificando cédulas brasileiras (R\$) usando análise de imagem por *smartphone*. **Quim. Nova** **43** (4), 447-454, 2020.
- VON MÜHLEN, L. *et al.* Miniaturized Method for Chemical Oxygen Demand Determination Using the PhotoMetrix PRO Application. **Molecules** **27**, 4721, 2022.
- ZAMBON, S. Artigo publicado por pesquisadores o IQSC ganha capa de revista de impacto em Química Analítica. **Portal USP São Carlos**. Universidade de São Paulo. São Carlos. 2 de maio de 2018. Disponível em: <https://saocarlos.usp.br/artigo-publicado-por-pesquisadores-o-iqsc-ganha-capa-de-revista-de-impacto-em-quimica-analitica/>. Acessado em 8 de junho de 2024.
- ZAMPIER, LM *et al.* Determination of Ozone or Hypochlorite in Waters Based on Digital Images Analysis Using Same Reagent. **J. Braz. Chem. Soc.** **32** (11), 2140-2151, 2021.