

Artigo

Desenvolvimento e Avaliação de um Protótipo de Colorímetro por Imagens Digitais**Costa, A. B.;* Corrêa, G. L. P.; Alessio, K. O.; Garcia, A. D.; Rothmund, K.; Dalberto, R.; Molz, R. F.; Kirst, A.***Rev. Virtual Quim.*, 2016, X (X), no prelo. Data de publicação na Web: 18 de setembro de 2016<http://rvq.sbq.org.br>**Development and Evaluation of a Colorimeter Prototype by Digital Images**

Abstract: This work aimed to developed a prototype system for colorimetric determinations by digital images, as well evaluate their functionality to determine phosphorus concentration in natural waters. This study was motivated by the necessity of portable tools, alternatively to spectrometer, to optimize the analysis time, transportation costs and storage of samples. The results of the proposed device were compared with a spectrophotometric reference method, and the proposed method presented satisfactory results for phosphorus determination.

Keywords: Digital images; colorimeter; phosphorus determination.

Resumo

Este trabalho teve como objetivo desenvolver um protótipo de sistema para determinações colorimétricas por imagens digitais, bem como avaliar a sua funcionalidade na determinação da concentração de fósforo em águas naturais. Este estudo foi motivado pela necessidade de ferramentas portáteis, como alternativa para espectrômetros, para otimizar o tempo de análise, os custos de transporte e armazenamento de amostras. Os resultados do dispositivo proposto foram comparados com um método espectrofotométrico de referência, e o método proposto apresentou resultados satisfatórios para determinação de fósforo.

Palavras-chave: Imagens digitais; colorímetro; determinação de fósforo.

* Universidade de Santa Cruz do Sul, Programa de Pós-graduação em Sistemas e Processos Industriais, Campus Santa Cruz do Sul, CEP 96815-900, Santa Cruz do Sul-RS, Brasil.

✉ adilson@unisc.br

DOI:

Desenvolvimento e Avaliação de um Protótipo de Colorímetro por Imagens Digitais

Adilson Ben da Costa,^{a,*} Gelson Luis P. Corrêa,^a Keiti O. Alessio,^b André D. Garcia,^b Katuscia Rothmund,^c Roguél Dalberto,^a Rolf Fredy Molz,^a Alcido Kirst^d

^a Universidade de Santa Cruz do Sul, Programa de Pós-graduação em Sistemas e Processos Industriais, Campus Santa Cruz do Sul, CEP 96815-900, Santa Cruz do Sul-RS, Brasil.

^b Universidade de Santa Cruz do Sul, Curso de Química, Campus Santa Cruz do Sul, CEP 96815-900, Santa Cruz do Sul-RS, Brasil.

^c Universidade de Santa Cruz do Sul, Curso de Engenharia Ambiental, Campus Santa Cruz do Sul, CEP 96815-900, Santa Cruz do Sul-RS, Brasil.

^d Universidade de Santa Cruz do Sul, Departamento de Química e Física, Campus Santa Cruz do Sul, CEP 96815-900, Santa Cruz do Sul-RS, Brasil.

* adilson@unisc.br

Recebido em 26 de agosto de 2015. Aceito para publicação em 12 de setembro de 2016

1. Introdução

2. Objetivo

3. Metodologia

4. Resultados e Discussão

4.1. Montagem da câmara de aquisição de imagens

4.2. Desenvolvimento do software

4.3. Determinação de fósforo em águas naturais

5. Considerações finais

1. Introdução

A química analítica é a área da química que atua na separação, identificação e determinação das quantidades relativas dos constituintes de uma amostra, através da aplicação e desenvolvimento dos métodos clássicos e instrumentais de análise.¹

Sua importância cotidiana, é indiscutível e reflete em uma série de benefícios à sociedade. Os resultados analíticos são informações científicas que permitem controlar processos de produção, determinar características nutricionais dos alimentos, garantir a qualidade de combustíveis, medicamentos, bem como produzir diagnósticos de qualidade ambiental e de saúde.

Em função disto, a demanda por informações analíticas é crescente, e impõe a necessidade contínua de investimentos no desenvolvimento de novas metodologias de análise, que possibilitem uma maior frequência de análise, sem comprometer a qualidade dos resultados.

No que tange ao monitoramento da qualidade da água esta realidade não é diferente. Seja para fins de potabilidade ou manutenção de ambientes aquáticos, a química analítica assume papel fundamental na produção de informação, a partir da qual poderão ser tomadas decisões, por parte das autoridades competentes, visando o controle dos problemas ambientais.

Devido as grandes dimensões das bacias hidrográficas brasileiras, a realização das análises químicas *in situ* é um fator importante para agilizar as atividades das equipes de coleta. Esta estratégia evita erros por problemas na preservação de amostras, minimiza o consumo de materiais, reagentes, e a geração de resíduos.

Neste sentido, atualmente estão disponíveis instrumentos portáteis que permitem a determinação instantânea de diferentes variáveis, como: pH, condutividade elétrica, oxigênio dissolvido, turbidez, sólidos totais dissolvidos e temperatura.²

Estas determinações, na sua maioria, são realizadas por sensores eletroquímicos. No entanto, quando a determinação das espécies químicas exige a utilização de outra técnica, como a espectroscopia, a sua determinação *in situ* é dificultada, em função dos altos custos de equipamentos portáteis. Além disto, muitos equipamentos são sensíveis à utilização em condições adversas de temperatura e umidade, ou quando sujeitos a trepidações e poeira.

Como uma alternativa aos espectrofotômetros, tem sido estudados e implementados diferentes sistemas de análise baseados no uso de imagens obtidas por câmeras digitais,^{3,4} scanners,^{5,6} webcams^{7,8} e aplicativos para telefones celulares.⁹ Essas ferramentas podem introduzir maior mobilidade aos

procedimentos analíticos, permitindo de maneira mais fácil a realização de análises *in situ*.

2. Objetivo

Este estudo teve como objetivo desenvolver um protótipo de colorímetro por imagens digitais, portátil, que possa ser utilizado em substituição ao espectrofotômetro ou colorímetro convencionais.

No desenvolvimento desta pesquisa o sistema foi avaliado na determinação de fósforo em águas naturais.

Cabe destacar que, além de resultados equivalentes aos obtidos por equipamentos comerciais, o baixo custo, a fácil manutenção, as dimensões reduzidas e a alta frequência de análise são condições de compromisso.

3. Metodologia

A metodologia deste estudo foi organizada em quatro etapas principais.

Primeiramente foi projetada uma câmara de aquisição de imagens digitais para disposição dos componentes do sistema (Figura 1):

a) webcam USB (do inglês *Universal Serial Bus*) marca FORTREK, modelo C159, com resolução máxima real de 1280x960 (1,3 MP) com sensor de imagem do tipo CMOS VGA (do inglês *complementary metal-oxide semiconductor* video graphics array);

b) cubeta de quartzo com 10 mm de caminho óptico;

c) sistema de iluminação composta por 30 LEDs (do inglês *light emitting diode*), branco frio (6500 K).

O projeto foi desenvolvido utilizando o software SketchUp Pro 2014 (Google Inc.), e

o seu *layout* teve como compromissos eliminar interferências de iluminação externa, miniaturizar suas dimensões, e

garantir sua robustez para utilização em atividades a campo.

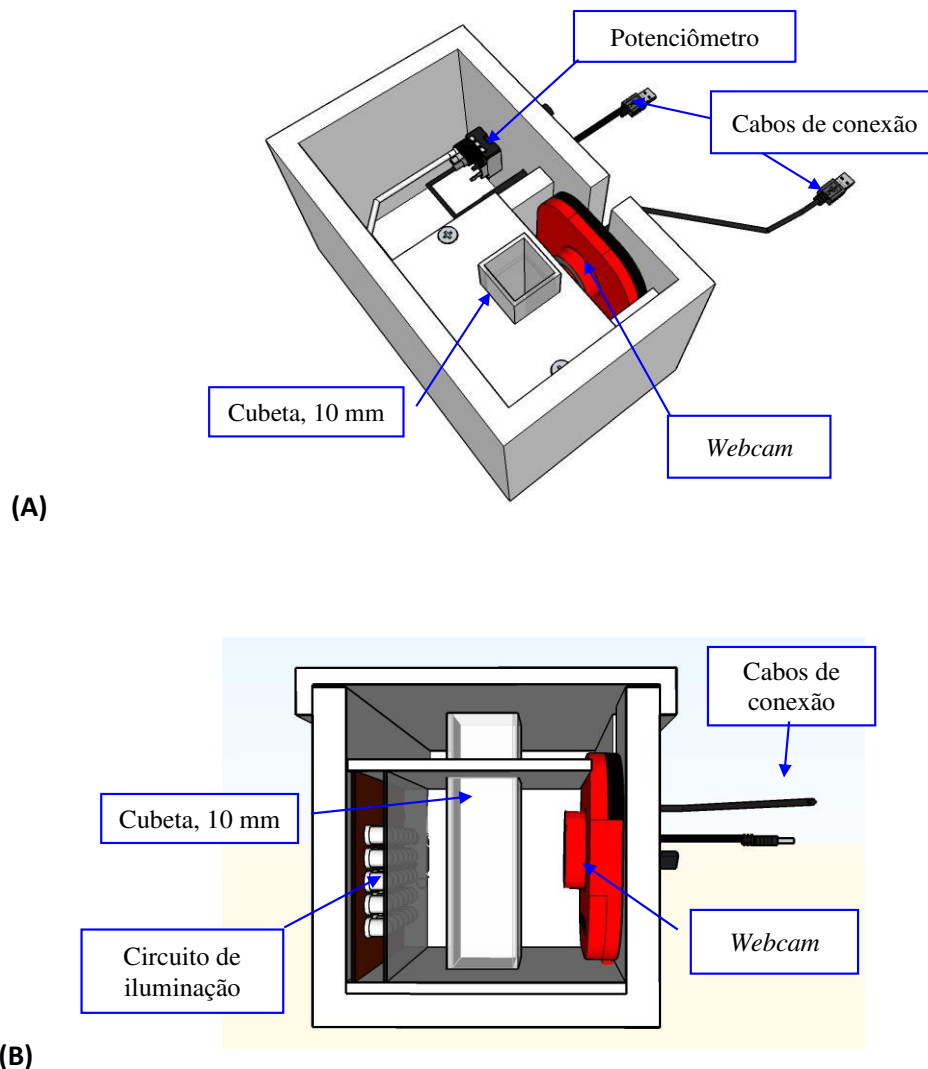


Figura 1. Projeto da câmara de captura de imagens (A - vista superior, B – corte lateral)

Posteriormente foi desenvolvido o software para aquisição e tratamento de imagens digitais, em MATLAB® 2009a (The MathWorks, Natick, MA, USA), cujo ambiente foi organizado em três áreas: acionamento da *webcam*, calibração e área de análise.

Para o protótipo desenvolvido neste estudo o software foi executado como uma rotina do software MATLAB®. No entanto, para uma maior comodidade dos usuários o programa pode ser compilado para um arquivo executável, permitindo sua execução

utilizando o MATLAB Runtime (software gratuito).

Após a montagem do protótipo, este foi testado na determinação de fósforo (fósforo reativo total) em águas naturais, pelo método do ácido ascórbico (4500-P E), descrito pelo *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*.¹⁰ O princípio deste método está baseado na reação do ortofosfato em meio ácido com o molibdato de amônio, formando ácido fosfomolibdico. O ácido fosfomolibdico é reduzido pelo ácido

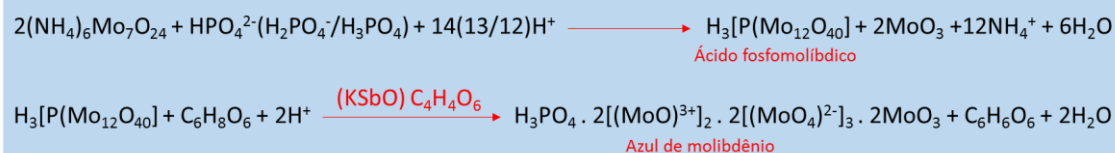
ascórbico, numa reação catalisada pelo antimoniltartarato de potássio, formando um complexo de coloração azul (azul de molibdênio), que apresenta absorção máxima em 880 nm (Esquema 1).^{10,11}

Todas as soluções de referência e demais soluções utilizadas nesse trabalho foram preparadas com água purificada (resistividade > 18 MΩ cm). Todos os reagentes utilizados foram de padrão analítico (P.A.): ácido sulfúrico (Merck, Darmstadt, Alemanha), antimoniltartarato de potássio (Vetec, Rio de Janeiro, Brasil), molibdato de amônio (Vetec, Duque de Caxias, Brasil), ácido ascórbico (Merck, Darmstadt, Alemanha), ácido nítrico (Merck, Darmstadt, Alemanha). As soluções de referência para a curva analítica foram preparadas nas concentrações de 0,1, 0,25, 0,50 e 1,25 mgL⁻¹ pela dissolução de fosfato de potássio dibásico (Synth, Diadema, Brasil) em 50 mL de água purificada.

A última etapa compreendeu a avaliação do desempenho do protótipo em comparação com um espectrofotômetro

FEMTO (modelo 600 Plus), na determinação de fósforo em sete amostras de águas de poço filtradas em carvão ativado de osso. Esse processo de filtração é conhecido por liberar uma quantidade significativa de fósforo na água filtrada e por isso foi selecionado para este experimento.¹²

Na comparação dos resultados foi aplicado o teste *t* de Student pareado, com nível de confiança de 95%, utilizando o software GraphPad InStat[®] versão 3.00. Além disto, foram determinadas as seguintes figuras de mérito: limite de detecção ($LD = \bar{x} + 3s$),¹³ limite de quantificação ($LQ = \bar{x} + 10s$),¹³ coeficiente de correlação de Pearson, coeficiente de determinação, coeficiente angular (sensibilidade), ponto de intersecção, raiz quadrada do erro médio de calibração (RMSEC, do inglês *root mean square error of calibration*) e a raiz quadrada do erro médio de validação cruzada (RMSECV, do inglês *root mean square error of cross validation*).



Esquema 1. Reações de formação do ácido fosfomolibdico e do azul de molibdênio para determinação de ortofosfato em água

4. Resultados e Discussão

4.1. Montagem da câmara de aquisição de imagens

A Figura 2 apresenta a vista superior da câmara de aquisição de imagens construída em MDF (do inglês *Medium-Density Fiberboard*), com dimensões de 100 x 62 x 52 mm e peso total de 250 g. A câmara foi pintada de branco fosco para proporcionar

iluminação uniforme e evitar o efeito de reflexão especular e, totalmente fechada, para minimizar a interferência da iluminação do ambiente.^{4,7,14}

Um sistema de iluminação composto por 30 LEDs brancos de alta intensidade, ligados em paralelo, foi posicionado na parte oposta a *webcam*, e separado da cubeta por uma placa de acrílico branco (2 mm) que auxiliou na melhor distribuir da radiação sobre a amostra. O circuito de alimentação dos LEDs foi composto por um potenciômetro ajustado em 5 Ω conectado entre o ânodo dos LEDs e

o contato positivo de um cabo USB, e o cátodo dos LEDs foram ligados diretamente ao contato GND do cabo USB, o qual foi

conectado diretamente à porta USB de um notebook (Figura 3).

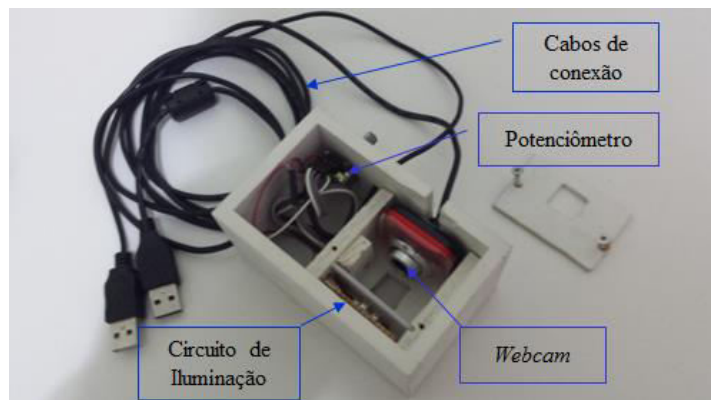


Figura 2. Imagem superior da câmara de captura de imagens construída em MDF

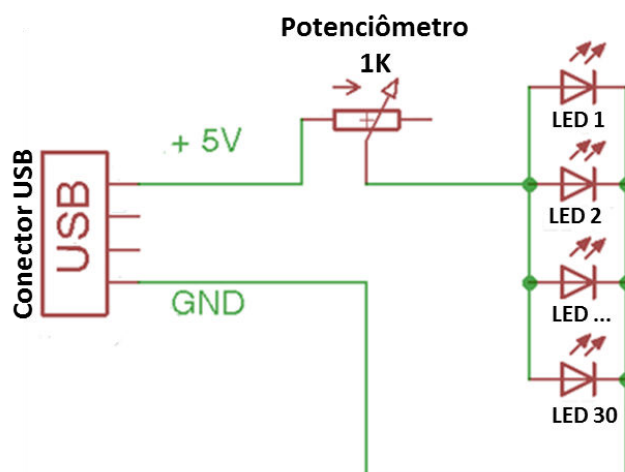


Figura 3. Esquema do circuito elétrico de instalação dos LEDs

4.2. Desenvolvimento do software

A interface gráfica do software para o controle de aquisição e tratamento de imagens pode ser observado na Figura 4. O software foi desenvolvido de forma a permitir o controle da *webcam* na captura de imagens, bem como efetuar o tratamento das imagens capturadas e desenvolver modelos de regressão por mínimos quadrados parciais para a análise

colorimétrica.

A área do software reservada para ligar a *webcam* foi criada para ativar a câmera mantendo a imagem da amostra visível ao usuário. As imagens foram adquiridas com dimensões de 45x45 pixels, com uma resolução de 24-bits e alinhada no centro da amostra. Por fim as imagens foram armazenadas em um arquivo de extensão “.jpg”.



Figura 4. Imagem da interface gráfica do software para controle de aquisição e tratamento de imagens digitais

A área de calibração foi desenvolvida com o propósito de gerar a curva analítica do sistema com até seis soluções de referência (incluindo a amostra do branco).

A Figura 5 mostra a sequência de funcionamento das áreas de calibração e análise. A Figura 6 apresenta uma visão geral do protótipo.

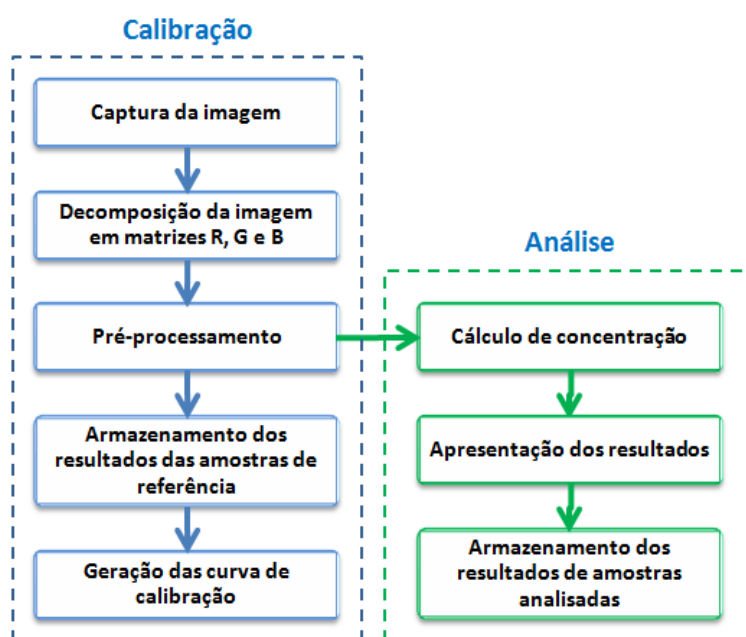


Figura 5. Fluxograma de funcionamento do software de captura e tratamento de imagens digitais – Área de calibração e análise

Os processos de calibração ou análise das amostras iniciam na captura da imagem da amostra contida na cubeta, que corresponde a um *frame*. A imagem é decomposta em matrizes numéricas que correspondem aos

componentes de cor R, G e B (do inglês *red, green and blue*) de 45x45 pixels. Por fim, as matrizes são pré-processadas de forma a obter, em separado, os valores de R, G e B, o Vetor RGB (Eq. 1)¹³ e Soma RGB (Eq. 2).

$$V_{(RGB)} = \sqrt[2]{R^2 + G^2 + B^2} \quad (1)$$

$$Soma_{(RGB)} = R + G + B \quad (2)$$

Após o pré-processamento, o software segue seu fluxo de processamento, seja para calibração ou análise de amostras.

Posteriormente a aquisição das imagens das amostras de referência, e acionado o

comando “Gerar Equação da Reta” são calculados os valores de cada componente de cor, que são armazenados junto com os valores de concentração informados pelo usuário.

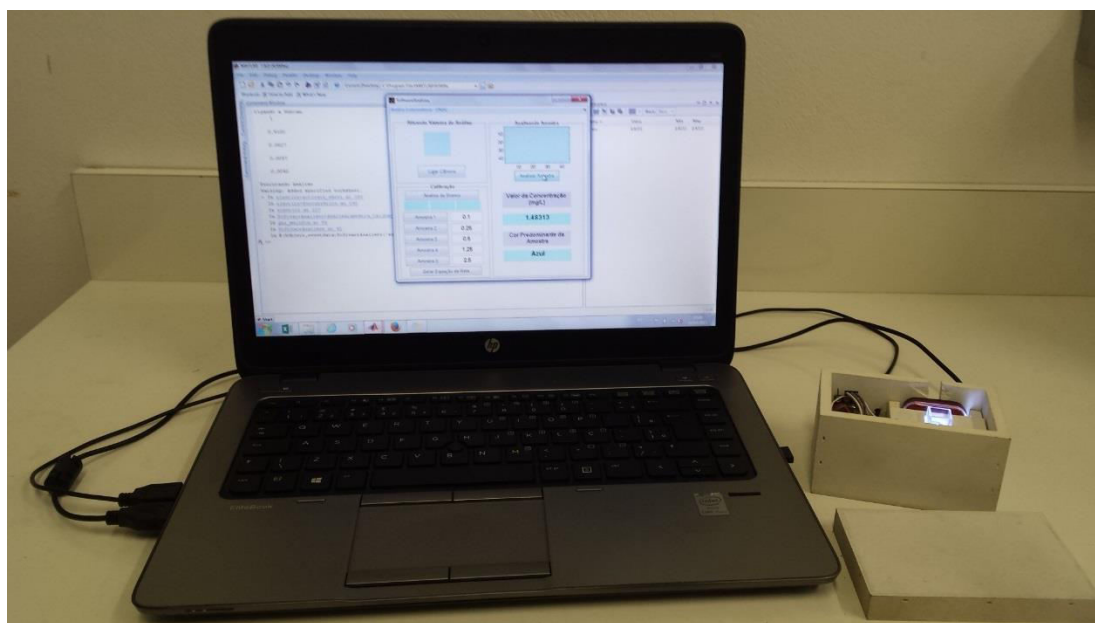


Figura 6. Protótipo de colorímetro por imagens digitais desenvolvido para a determinação de fósforo em água

Como a correlação entre os valores dos componentes de cor e a concentração das amostras é inversamente proporcional, foi aplicada a inversa ($1/x$) em todos os dados adquiridos. Estabelecendo assim uma relação diretamente proporcional (como proposto pela lei de Beer¹⁵) entre a concentração das

amostras e as componentes de cor R, G, B, Vetor RGB e Soma RGB. Posteriormente os dados foram, também, normalizados em máximo = 1 e mínimo = 0.

Todos os dados adquiridos e processados pelo software foram armazenados automaticamente em arquivos específicos,

em extensão “.xlsx” (padrão Microsoft Excel), o que permite um acesso fácil do usuário às matrizes de dados. Nestes arquivos ficam armazenados todos os dados das curvas analíticas (produzidas com os componentes de cor R, G, B Vetor RGB e Soma RGB) tais como o coeficiente de determinação (R^2), coeficiente angular (a) e ponto de intersecção (b).

Após a calibração, a área do software referente a análise de amostras fica disponível ao usuário para aplicação, e os dados obtidos ficam disponíveis em arquivo

com extensão “.xlsx”, com a data e o horário da análise, permitindo uma visualização futura e a criação de um banco de dados.

4.3. Determinação de fósforo em águas naturais

A Tabela 1 apresenta os valores médios obtidos para cada uma das componentes de cor R, G e B nas diferentes amostras de referência para fósforo (entre 0,00 e 1,25 mg L⁻¹) utilizadas para a curva analítica.

Tabela 1. Valores médios e respectivo desvio-padrão (n=3) para os componentes de cor R, G e B em função da concentração de fósforo nas amostras de referência

Componente de cor		Concentração de fósforo, mg L ⁻¹ (P)				
		0,00	0,10	0,25	0,50	1,25
R	Média	250,4095	242,9343	233,5574	216,9570	185,9860
	DP	< 0,0001	0,9308	2,9675	0,6036	3,0109
G	Média	254,9035	254,8030	251,4713	239,4876	214,3305
	DP	< 0,0001	0,174811	2,232459	0,58704	3,67504
B	Média	254,8381	254,8625	254,7230	254,3648	254,7743
	DP	< 0,0001	0,0998	0,2030	0,1028	0,1039

Como a cor azul é predominante, formada pelo azul de molibdênio¹⁰, os resultados para a componente B apresentam uma variação insignificante em função da concentração das amostras (apenas 0,025% entre a amostra do branco e de maior concentração), enquanto que, para as mesmas amostras, as componentes R e G atingem valores de 25,7% e 15,9%, respectivamente. Isto permite concluir que, a intensidade da coloração azul observada nas amostras é resultado da redução dos valores da componente vermelha (R) e verde (G) e não de alterações nos valores da componente azul (B). Por isso, o monitoramento das componentes R e G é mais eficiente na quantificação de espécies químicas que produzam coloração azul à

solução de amostra.

A Tabela 2 apresenta os resultados médios para os componentes de cor R, G, B, Vetor RGB e Soma RGB, em função da concentração de fósforo, e respectivas figuras de mérito. A mesma tabela apresenta, comparativamente, os resultados obtidos utilizando um espectrofotômetro FEMTO (modelo 600 Plus) como instrumento de referência.

Os melhores resultados de regressão foram obtidos com as componentes de cor R e G, Vetor RGB e Soma RGB (Figura 6), apresentando melhores valores de coeficiente de correlação, sensibilidade e erros de calibração e validação cruzada. No

entanto a componente R foi selecionada para a análise das amostras, pois apresentou a maior amplitude de sinal, entre 250,4095 e 185,9860 e menor valor de RMSECV (Tabela

1). Contudo, é possível observar que a utilização da componente G, do Vetor RGB e Soma RGB também fornecem resultados satisfatórios.

Tabela 2. Valores médios para os componentes de cor R, G e B, Vetor RGB e Soma RGB, normalizados, e valores de absorbância obtidas no espectrofotômetro, em função da concentração de fósforo, e respectivas figuras de mérito

Conc. mg L ⁻¹ (P)	Comp. R		Comp. G		Comp. B		Vetor RGB		Soma RGB		Absorbância	
	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP
0,00	0,000	0,002	0,000	0,001	0,000	0,001	0,000	0,002	0,000	0,001	0,000	0,002
0,10	0,089	<0,001	0,002	<0,001	0,000	<0,001	0,065	<0,001	0,063	<0,001	0,043	0,005
0,25	0,208	0,003	0,072	<0,001	0,280	<0,001	0,178	0,002	0,172	0,001	0,187	0,003
0,50	0,445	0,001	0,340	0,001	1,000	<0,001	0,446	0,001	0,433	<0,001	0,302	0,002
1,25	1,000	0,016	1,000	0,017	0,177	<0,001	1,000	0,013	1,000	0,011	0,693	0,001
R	0,9989		0,9929		0,1953		0,9980		0,9985		0,9997	
R ²	0,9978		0,9859		0,0382		0,9961		0,9970		0,9995	
a	0,799		0,842		0,158		0,812		0,813		0,601	
b	0,013		-0,071		0,235		-0,003		-0,008		0,004	
LD	0,008		0,004		0,020		0,007		0,004		0,002	
LQ	0,025		0,012		0,056		0,025		0,012		0,007	
RMSEC	0,011		0,021		1,222		0,016		0,013		0,005	
RMSECV	0,033		0,064		3,186		0,035		0,027		0,017	

Onde: R – coeficiente de correlação de Pearson; R² – coeficiente de determinação; a – coeficiente angular (sensibilidade); b – ponto de intersecção; LD – limite de detecção; LQ – limite de quantificação; RMSEC – Raiz quadrada do erro médio de calibração; RMSECV - raiz quadrada do erro médio de validação cruzada. * n amostras = 3; n branco = 10.

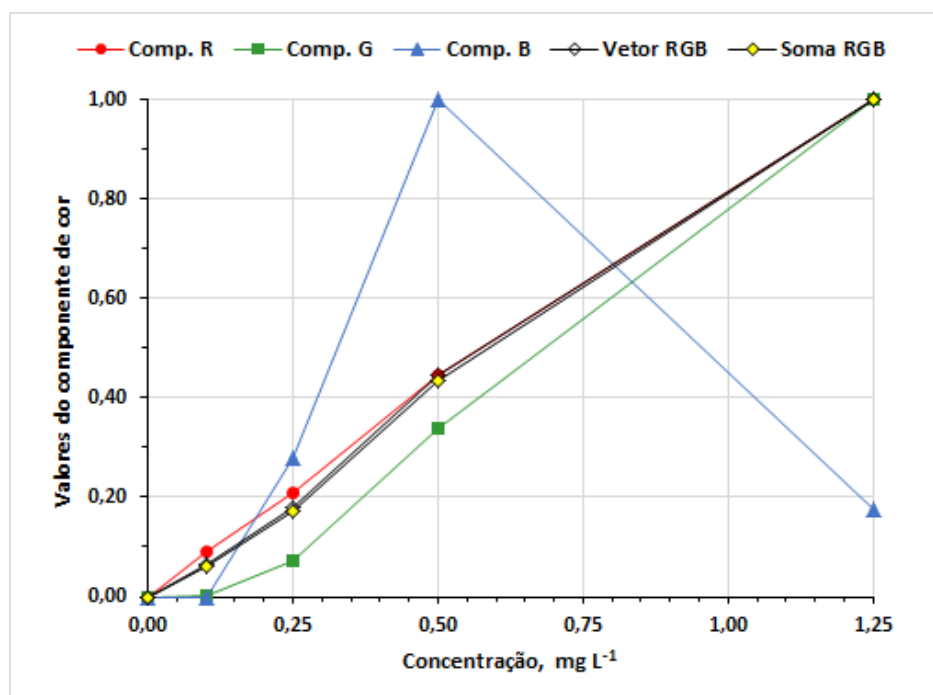


Figura 6. Curvas analíticas obtidas pelos valores médios das componentes de R, G e B, Vetor RGB e Soma RGB, na amostra de referência para fósforo

A Tabela 3 apresenta os resultados obtidos pelo sistema proposto e pelo método de referência, na determinação de fósforo em amostras de águas de poço filtradas em carvão ativado de osso. Não foram identificadas diferenças significativas entre as duas metodologias utilizadas ($p > 0,05$).

Apesar de não terem sido desenvolvidos testes de específicos, é importante destacar

que, a metodologia proposta está sujeita aos mesmos interferentes do método de referência¹⁰, tais como interferência positiva em amostras com concentração de arsênio superior a $0,1 \text{ mg L}^{-1}$ e interferências negativas em amostras com concentração de cromo hexavalente ou nitrito acima de $1,0 \text{ mg L}^{-1}$.

Tabela 3. Valores médios ($n=3$) dos resultados de concentração de fósforo em água utilizando o sistema de análise proposto (componente R) e a metodologia de referência

Amostras	Método proposto (Comp. R)	Método de referência
Amostra 1	< LD (0,008)	< LD (0,002)
Amostra 2	$0,02 \pm 0,04$	$0,03 \pm 0,01$
Amostra 3	< LD (0,008)	< LD (0,002)
Amostra 4	$0,29 \pm 0,06$	$0,32 \pm 0,01$
Amostra 5	$0,35 \pm 0,05$	$0,33 \pm 0,01$
Amostra 6	$1,30 \pm 0,07$	$1,40 \pm 0,06$
Amostra 7	$1,29 \pm 0,04$	$1,37 \pm 0,06$

5. Considerações finais

Neste trabalho, foram exploradas as aplicações do uso de imagens digitais, capturadas por uma *webcam*, para análises químicas colorimétricas, mostrando assim a viabilidade do método proposto.

A câmara construída para aquisição das imagens digitais contribuiu de forma significativa para a aquisição das imagens das amostras evitando ruídos oriundos de iluminação externa, além de facilitar o transporte do sistema para análises de campo pelas suas dimensões reduzidas. Outra questão a ser considerada foi o baixo custo de construção do aparato, em torno de R\$ 70,00, considerando todos os acessórios utilizados.

O software de controle e tratamento de imagens digitais desenvolvido apresenta uma interface de fácil utilização durante as

análises, atendendo desta forma os padrões de usabilidade esperados.

Os testes para a determinação de fósforo produziram resultados satisfatórios e equivalentes ao método de referência, comprovando assim a eficiência, no entanto outras aplicações deste sistema ainda devem ser exploradas.

Por fim, os autores informam que o software desenvolvido neste estudo é gratuito e estará disponível em www.unisc.br/ppgspi, assim que registrado no INPI (Instituto Nacional da Propriedade Industrial).

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), a Coordenação de

Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Fundo de Apoio a Pesquisa da Universidade de Santa Cruz do Sul (FAP).

Referências Bibliográficas

- ¹ Holler, F. J.; Skoog, D. A.; Crouch, S. R.; *Princípios de Análise Instrumental*, 6a. ed., Bookman: Porto Alegre, 2009.
- ² Hanna Instruments. Sítio da Hanna Brasil: Instrumentos de medição e controle, Tratamento de água. Disponível em: <http://www.hannabrasil.com.br>. Acesso em: 1 março 2016.
- ³ Costa, A.; Cruz, D.; Aléssio, K.; Garcia, A.; Rothmund, K.; Carvalho, F.; Barin, J.; Tedesco, L. Aplicação da termografia por infravermelho para titulações termométricas. *Orbital* **2015**, *7*, 196. [CrossRef]
- ⁴ Tôrres, A. R.; Lyra, W. S.; Andrade, S. I. E.; Andrade, R. A. N.; Silva, E. C.; Araújo, M. C. U.; Gaião, E. N. A digital image-based method for determining of total acidity in red wines using acid–base titration without indicator. *Talanta* **2011**, *84*, 601. [CrossRef]
- ⁵ Gomes, M. S.; Trevisan, L. C.; Nóbrega, J. A.; Kamogawa, M. Y. Uso de scanner em espectrofotometria de absorção molecular: aplicação em experimento didático enfocando a determinação de ácido ascórbico. *Química Nova* **2008**, *31*, 1577. [CrossRef]
- ⁶ Souza, F. R.; Duarte Junior, G. F.; Garcia, P. T.; Coltro, W. K. T. Avaliação de dispositivos de captura de imagens digitais para detecção colorimétrica em microzonas impressas. *Química Nova* **2014**, *37*, 1171. [CrossRef]
- ⁷ Lyra, W. S.; Santos, V. B.; Dionízio, A. G. G.; Martins, V. L.; Almeida, L. F.; Gaião, E. N.; Diniz, P. H. G. D.; Silva, E. C.; Araújo, M. C. U. Digital image-based flame emission spectrometry. *Talanta* **2009**, *77*, 1584. [CrossRef]
- ⁸ Gaião, E. N.; Martins, V. L.; Lyra, W. S.; Almeida, L. F.; Silva, E. C.; Araújo, M. C. U. Digital image-based titrations. *Analytica Chimica Acta* **2006**, *570*, 283. [CrossRef]
- ⁹ PhotoMetrix. Sítio da Loja de Aplicativos Google Play. Disponível em <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.ghelfer.photometrix>. Acesso em: 1 agosto 2015.
- ¹⁰ APHA; AWWA; WEF. Standard methods for the examinations of water and wastewater, 21a. ed., Washington, 2005. [Link]
- ¹¹ Pohling, R. Reações químicas na análise de água, Rolf Pohling: Fortaleza, 2009.
- ¹² Costa, A. B.; Lobo, E. A.; Soares, J.; Kirst, A. Desfluoretação de águas subterrâneas utilizando filtros de carvão ativado de osso. *Águas Subterrâneas* **2013**, *27*, 60. [CrossRef]
- ¹³ INMETRO. Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia Brasil. Orientações sobre validação de Métodos Analíticos. Disponível em: http://www.inmetro.gov.br/Sidoq/Arquivos/CGCRE/DOQ/DOQ-CGCRE-8_04.pdf. Acesso em: 1 março 2016.
- ¹⁴ Andrade, S. I. E.; Lima, M. B.; Barreto, I. S.; Lyra, W. S.; Almeida, L. F. A digital image-based micro-flow-batch analyzer. *Microchemical Journal* **2013**, *109*, 106. [CrossRef]
- ¹⁵ Beer, A. Bestimmung der Absorption des rothen Lichts in farbigen Flüssigkeiten, *Annalen der Physik und Chemie* **1852**, *86*, 78. [CrossRef]