

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”  
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS DO VALE DO RIBEIRA— FCAVR

Campus de Registro

**IMAGENS DIGITAIS PARA DETERMINAÇÃO DA  
CONCENTRAÇÃO DE FÓSFORO EM AMOSTRAS DE SOLO POR  
MEIO DO APLICATIVO PHOTOMETRIX  
TRABALHO ORIGINAL DE PESQUISA**

**BÁRBARA GONÇALVES DE MORAIS**

Trabalho de graduação apresentado à Faculdade de Ciências Agrárias do Vale do Ribeira da Universidade Estadual Paulista - UNESP, para obtenção do título de ENGENHEIRA AGRÔNOMA.

REGISTRO - SP

1º semestre/2023

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”  
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS DO VALE DO RIBEIRA— FCAVR

Campus de Registro

**IMAGENS DIGITAIS PARA DETERMINAÇÃO DA  
CONCENTRAÇÃO DE FÓSFORO EM AMOSTRAS DE SOLO POR  
MEIO DO APLICATIVO PHOTOMETRIX  
TRABALHO ORIGINAL DE PESQUISA**

**BÁRBARA GONÇALVES DE MORAIS**

**Orientador:** Prof. Dr. Leandro J. G. de Godoy

Trabalho de graduação apresentado à Faculdade de Ciências Agrárias do Vale do Ribeira da Universidade Estadual Paulista - UNESP, para obtenção do título de ENGENHEIRA AGRÔNOMA.

REGISTRO - SP

1º semestre/2023

M827i                      Morais, Bárbara Gonçalves de  
                                  Imagens digitais para determinação da concentração de fósforo em  
                                  solo por meio do aplicativo Photometrix / Bárbara Gonçalves de  
                                  Morais. -- Registro, 2023  
                                  49 f. : tabs., fotos

                                  Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia  
                                  Agrônômica) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de  
                                  Ciências Agrárias do Vale do Ribeira, Registro  
                                  Orientadora: Leandro José Grava de Godoy

                                  1. Solos Analise. 2. Solos Teor de Fósforo. 3. Imagens Digitais. I.  
                                  Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Ciências Agrárias do Vale do Ribeira, Registro. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho a Deus, primeiramente, fonte de toda sabedoria e força, por me guiar e sustentar durante toda a minha jornada acadêmica. À minha mãe Edilaine alicerce do meu crescimento, agradeço por todo o amor, apoio e incentivo incondicional. As minhas irmãs Bianca, Blenda e Brunna, vocês foram minha inspiração e motivação para superar desafios. Ao meu pai Edmilson que sempre se fez presente e nunca me deixou desacreditar do meu potencial. Em especial aos meus sobrinhos Maria Clara e João Miguel, que foram minha força e são a razão de eu buscar ser melhor a cada dia.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço imensamente a todas as pessoas que, de alguma forma, contribuíram para a realização desta monografia. Em especial, gostaria de agradecer ao meu orientador Prof. Dr. Leandro J. G. de Godoy, cuja paciência e disponibilidade foram fundamentais para o meu desenvolvimento acadêmico.

À Sra. Cilene, Sra. Irene, Matheus e Mariana, agradeço por todo apoio, todo carinho e acolhimento. Vocês foram minha família em um momento muito importante para sempre e vou levá-los em meu coração.

Aos meus amigos, em especial Giovanna, Jéssica, Tamary, Daniela, Luma, Larissa e Felipe, verdadeiros companheiros de jornada, que me acompanharam nas noites de estudo, nas risadas e nas dificuldades, não tenho palavras suficientes para expressar minha gratidão. Seus conselhos, encorajamentos e presença constante fizeram toda a diferença. Esta dedicação é um tributo à nossa amizade duradoura.

A todos os professores que passaram por minha vida, que contribuíram direta ou indiretamente para a minha trajetória acadêmica, meu sincero agradecimento. Este trabalho é dedicado a vocês, pois cada um de vocês desempenhou um papel fundamental no meu sucesso.

Agradeço em especial a minha amiga Franciele, por ter colaborado diretamente na parte prática desse trabalho. Além disso, agradeço à Faculdade de Ciências Agrárias do Vale do Ribeira (FCAVR) e ao Laboratório de Fertilidade do Solo e Nutrição Mineral de Plantas (LAFEN) pela oportunidade de realizar este estudo e pelo apoio logístico e financeiro.

Por fim, agradeço a todas as pessoas que, de alguma maneira, contribuíram para a concretização desta monografia.

## RESUMO

O fósforo desempenha um papel essencial no crescimento e produção vegetal, influenciando diversos processos biológicos e é importante sua determinação no solo para fornecimento adequado do nutriente para as culturas agrícolas visando melhor manejo e evitando o excesso do nutriente no solo. Como alternativa do método tradicional com espectrofotômetro, as imagens digitais analisadas por meio de aplicativos têm sido amplamente utilizadas. Este estudo teve como objetivo, avaliar o uso de imagens digitais capturadas por *smartphones* (Motorola G7 Power e iPhone XR) para determinar a concentração de fósforo no solo por meio do aplicativo PhotoMetrix®, que permite o processamento e a análise colorimétrica em imagens digitais. O método colorimétrico de espectrofotometria é o método descrito como padrão e foi utilizado para comparação com as leituras feitas pelo aplicativo. Para garantir a precisão, uma caixa específica foi projetada para minimizar a interferência da luz externa, permitindo que apenas uma fita de diodos emissores de luz branca iluminasse exclusivamente a amostra. Foram utilizados seis tratamentos, definidos a partir da condição luminosa em que as imagens foram capturadas: luz natural, luz controlada com diferentes intensidades luminosas (10%, 40%, 70%, 100%) e o tratamento controle (espectrofotômetro). Observou-se que o conjunto *smartphone* e PhotoMetrix®, apresentou limitações na leitura das imagens quando a concentração de fósforo no solo ultrapassou  $100 \text{ mg dm}^{-3}$ . A concentração máxima registrada foi de  $82,21 \text{ mg dm}^{-3}$  para o Motorola e  $49,15 \text{ mg dm}^{-3}$  para o iPhone. Após a exclusão das amostras acima de  $100 \text{ mg dm}^{-3}$ , não foi observado diferença significativa entre os tratamentos utilizados. Quanto ao contraste de médias, foram encontradas diferenças significativas ( $P < 0,05$ ) em relação ao controle (espectrofotômetro). Os resultados indicaram que as médias das leituras com amostras acima de  $100 \text{ mg dm}^{-3}$  para o Motorola e o iPhone, foram significativamente inferiores às do controle ( $P < 0,05$ ). No caso dos dados sem amostras com concentração acima de  $100 \text{ mg dm}^{-3}$ , os tratamentos para ambos os aparelhos, não apresentaram variância significativa em relação ao espectrofotômetro ( $P < 0,05$ ). Ao analisar os dados das leituras realizadas nos diferentes níveis de intensidade de luz, constatou-se que o *smartphone* Motorola apresentou correlações e coeficientes de determinação ( $R^2$ ) mais altos na intensidade de 10% e 40% de luz. Por outro lado, para o iPhone, a intensidade de 10% de luz demonstrou a maior correlação e  $R^2$ . É importante ressaltar que a intensidade de 100% de luz resultou nos piores valores de correlação e  $R^2$  tanto para o Motorola quanto para o iPhone. Concluiu-se que é possível

determinar a concentração de P nas amostras de solo com concentração até  $80\text{mg dm}^{-3}$ , utilizando imagens digitais processadas no aplicativo Photometrix®.

**Palavras-chave:** Fósforo, Solo, Photometrix, Smartphone, Espectrofotometria.

## ABSTRACT

Phosphorus plays an essential role in plant growth and production, influencing several biological processes and its determination in the soil is important for adequate supply of the nutrient to crops, aiming at better management and avoiding the excess of the nutrient in the soil. As an alternative to the traditional method with a spectrophotometer, digital images analyzed using applications have been widely used. This study aimed to evaluate the use of digital images captured by smartphones (Motorola G7 Power and iPhone XR) to determine the phosphorus concentration in the soil through the PhotoMetrix® application, which allows the processing and colorimetric analysis of digital images. The colorimetric method of spectrophotometry is the method described as standard and was used for comparison with the readings taken by the application. To ensure accuracy, a specific box was designed to minimize interference from external light, allowing only a strip of a white light-emitting diode to exclusively illuminate the sample. Six treatments were used, defined by the light condition in which the images were captured: natural light, controlled light with different light intensities (10%, 40%, 70%, 100%), and the control treatment (spectrophotometer). It was observed that the smartphone and PhotoMetrix® set presented limitations in reading the images when the phosphorus concentration in the soil exceeded 100 mg dm<sup>-3</sup>. The maximum recorded concentration was 82.21 mg dm<sup>-3</sup> for the Motorola and 49.15 mg dm<sup>-3</sup> for the iPhone. After excluding those from samples above 100 mg dm<sup>-3</sup>, no significant difference was observed between the treatments used. As for the mean contrast, significant differences (P<0.05) were found in relation to the control (spectrophotometer). The results indicated that the average readings with samples above 100 mg dm<sup>-3</sup> for the Motorola and the iPhone were significantly lower than those for the control (P<0.05). In the case of data without samples with concentrations above 100 mg dm<sup>-3</sup>, the treatments for both devices did not show significant variance in relation to the spectrophotometer (P<0.05). When analyzing data from readings performed at different levels of light intensity, it was found that the Motorola smartphone showed higher correlations and coefficients of determination (R<sup>2</sup>) at 10% and 40% light intensity. On the other hand, for the iPhone, the 10% light intensity showed the highest correlation and R<sup>2</sup>. It is important to note that the 100% light intensity resulted in the worst correlation and R<sup>2</sup> values for both the Motorola and the iPhone. It was concluded that it is possible to determine the P concentration in soil samples with concentrations up to 80mg dm<sup>-3</sup>, using digital images processed in the Photometrix® application.

Keywords: Phosphorus, Soil, Photometrix, Smartphone, Spectrophotometry.

## CERTIFICADO

### TRABALHO DE GRADUAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA AGRONÔMICA

**TÍTULO:** "IMAGENS DIGITAIS PARA DETERMINAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE FÓSFORO EM AMOSTRAS DE SOLO POR MEIO DO APLICATIVO PHOTOMETRIX"

**ACADÊMICO:** BÁRBARA GONÇALVES DE MORAIS

**ORIENTADOR:** Prof. Dr. LEANDRO JOSÉ GRAVA DE GODOY

**PERÍODO:** \_ Semestre \_\_\_\_Ano

**Aprovado:**

**Reprovado:**

### BANCA EXAMINADORA:

**Presidente** Prof. Dr. Leandro José Grava de Godoy  LEANDRO JOSE GRAVA DE GODOY  
Data: 12/07/2023 12:13:56-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Documento assinado digitalmente

**Membro** Prof<sup>a</sup>. Dra. Elza Alves Corrêa  ELZA ALVES CORREA  
Data: 13/07/2023 16:24:55-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Documento assinado digitalmente

**Membro** Eng. Agr. Jessica Silva Rosa  JESSICA SILVA ROSA  
Data: 12/07/2023 18:17:39-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Documento assinado digitalmente

Registro, 10 / 07 / 2023

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>11</b>
<b>2. REVISÃO DE LITERATURA .....</b>	<b>13</b>
2.1 Disponibilidade de fósforo em solos brasileiros.....	13
2.2 Exigência de fósforo nas culturas agrícolas.....	13
2.3 Uso de imagens digitais na análise de solo.....	14
2.4 Tipos de câmeras para captura de imagens.....	16
2.5 Sistema RGB (Red, Green, Blue) .....	16
2.6 Aplicação da inteligência artificial na agricultura de precisão .....	18
2.7 Aplicativo PhotoMetrix® .....	19
<b>3. MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>21</b>
3.1 Montagem do aparato .....	23
3.2 Instrumentos para comparação .....	25
3.3 Preparo de soluções, tratamento da resina e extração do fósforo.....	26
3.4 Coleta de dados – PhotoMetrix® .....	28
3.5 Análises Estatísticas .....	30
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>31</b>
<b>5. CONCLUSÃO.....</b>	<b>39</b>
<b>6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>40</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A determinação dos principais nutrientes necessários para o desenvolvimento das culturas agrícolas é de suma importância para o manejo adequado da adubação, visando garantir um crescimento saudável das plantas e evitar o uso excessivo de fertilizantes no solo. Essa abordagem contribui para o crescimento saudável e a maximização da produtividade das culturas, ao mesmo tempo em que promove a sustentabilidade e a preservação dos recursos naturais uma vez que o excesso de fertilizantes pode resultar em lixiviação de nutrientes para corpos d'água, causando problemas de poluição.

Cada planta possui demandas específicas de nutrientes em cada fase do seu ciclo de vida, fazendo-se necessário o fornecimento adequado de macronutrientes para o desempenho de diversos processos vitais dentro da planta.

Os macronutrientes, como o nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K), desempenham papéis essenciais no metabolismo e crescimento das plantas. O nitrogênio é necessário para a formação de proteínas e aminoácidos, bem como para a síntese de clorofila, que desempenha um papel crucial na fotossíntese. O fósforo desempenha um papel fundamental na transferência de energia dentro das células, sendo um componente importante do ATP (adenosina trifosfato), a principal molécula de energia utilizada pelas plantas. Além disso, o fósforo está envolvido na formação de DNA, RNA e membranas celulares. Já o potássio, desempenha um papel vital na regulação do equilíbrio hídrico das plantas, na abertura e fechamento dos estômatos, na ativação de enzimas e no transporte de açúcares produzidos pela fotossíntese.

No desenvolvimento das plantas, o fósforo contribui também para o desenvolvimento saudável do sistema radicular, facilitando a absorção de água e nutrientes do solo. Ele também influencia diretamente na germinação das sementes, promovendo um início vigoroso do crescimento das plântulas, além de desempenhar um papel essencial na formação dos grãos.

A disponibilidade de fósforo nos solos brasileiros varia significativamente devido a uma combinação de fatores como origem do solo, acidez e interação com outros nutrientes. Em geral, os solos brasileiros apresentam uma tendência natural de baixa disponibilidade de fósforo, fazendo com que a importação de fósforo para adubação no Brasil seja uma estratégia para suprir a demanda agrícola e garantir o fornecimento do nutriente para as culturas.

A análise de solo desempenha um papel crucial nesse cenário, sendo uma ferramenta indispensável para assegurar o manejo adequado e maximizar a produtividade das culturas. Por meio dessa análise, obtêm-se informações precisas sobre as propriedades químicas, físicas e biológicas do solo, fornecendo *insights* valiosos sobre sua fertilidade e capacidade de sustentar o crescimento das plantas, considerando a exportação de nutrientes do solo e ajudando na estimativa da quantidade de adubo a ser utilizado. Esses dados são essenciais para o manejo adequado das culturas, garantindo a fertilidade do solo e a obtenção da máxima produtividade de forma sustentável.

O procedimento padrão para a determinação do fósforo em análises de amostras de solo, é por meio da espectrofotometria molecular na região do visível, demandando o uso de espectrofotômetro, aparelho de laboratório de alto valor e robustez.

Entretanto, com o avanço da tecnologia, espera-se que cada vez mais processos digitais moveis/portáteis como processamentos de imagens por aplicativos de *smartphones*, substituam ou complementem os processos manuais e processos que dependam de grandes equipamentos, possibilitando a agilidade no campo e diminuindo custos para o produtor.

O processamento analítico pelo RGB (Red-Green-Blue) em imagens digitais é uma técnica utilizada para extrair informações e realizar análises a partir dos diferentes canais de cor presentes em uma imagem. O modelo RGB é amplamente utilizado em sistemas de captura de imagens e exibição em dispositivos eletrônicos, como câmeras digitais e monitores.

O aplicativo Photometrix<sup>®</sup> é uma ferramenta de análise colorimétrica, capaz de determinar concentrações em amostras a partir de uma calibração feita pelo usuário, que fornece uma curva de valores conhecidos. A partir do processamento das imagens fornecidas para a curva, o aplicativo processa e determina as concentrações das imagens das amostras.

Diante disto, o presente estudo teve como objetivo avaliar o uso de aplicativo Photometrix<sup>®</sup> na determinação do fósforo em amostras de solo, como alternativa ao método tradicional de leitura em espectrofotômetro.

Objetivos específicos:

- Avaliar a exatidão do aplicativo frente a método de referência;
- Identificar limites de detecção do aplicativo utilizado;
- Avaliar e identificar os limites de captura de imagens de dois *smartphones*.

## **2. REVISÃO DE LITERATURA**

### **2.1 Disponibilidade de fósforo em solos brasileiros em solos brasileiros**

A disponibilidade de fósforo nos solos brasileiros desempenha um papel crucial no crescimento e na produção vegetal, influenciando diversos processos biológicos. Estudos realizados por Novais e Smyth (1999) e Roy et al. (2016) destacam a importância da disponibilidade de fósforo no solo como fator determinante para a produtividade agrícola. Estratégias de manejo do fósforo, como a adubação fosfatada adequada, são fundamentais para maximizar a eficiência do uso desse nutriente em solos tropicais.

De maneira geral, os solos brasileiros apresentam variação no teor de fósforo de 50 a mais de 1.800 mg kg<sup>-1</sup>, com uma média entre 300 e 500 mg kg<sup>-1</sup> (PAVINATO et al., 2021). No entanto, apenas uma pequena quantidade está disponível para as plantas. A dinâmica do fósforo nos solos brasileiros é influenciada por fatores como a mineralogia do solo e as práticas de manejo. Pereira et al. (2021) ressaltam a interação entre fósforo e argilominerais como um fator significativo na retenção e disponibilidade desse nutriente, uma vez que solos com altos teores de argila tendem a reter mais fósforo, resultando em menos disponibilidade para as plantas. Compreender essa relação é essencial para a adoção de práticas sustentáveis de manejo.

Em regiões tropicais, a fertilidade dos solos frequentemente é limitada pela baixa disponibilidade de fósforo, conforme destacado por Resende e Furtini Neto (2007). A aplicação de corretivos e fertilizantes fosfatados é fundamental para suprir a demanda de fósforo das culturas nessa região, onde a concentração desse nutriente pode variar amplamente devido a fatores geológicos, climáticos e de uso da terra.

A manutenção da disponibilidade sustentável de fósforo nos solos brasileiros é essencial para a qualidade e o manejo adequado dessas áreas. Alguns autores (CUNHA et al., 2018, 2010, 2011) apontam que a remoção excessiva de fósforo por meio da exportação de produtos agrícolas pode levar à depleção desse nutriente nos solos. Estratégias de manejo, como a reciclagem de resíduos orgânicos e a adubação fosfatada adequada, são cruciais para garantir a disponibilidade sustentável de fósforo nos solos brasileiros (RESENDE; FURTINI NETO, 2007).

### **2.2 Exigência de fósforo nas culturas agrícolas**

O fósforo é indispensável para a produção vegetal, interferindo nos processos de fotossíntese, respiração, armazenamento e transferência de energia, divisão celular e

crescimento das células (MOTOMURA et al., 2018), contribuindo para o crescimento prematuro das raízes, qualidade de frutas, verduras, grãos e formação das sementes (GRANT et al., 2001; SEVERO, 2021).

As diferentes culturas agrícolas apresentam variações significativas em suas necessidades de fósforo, variando de culturas menos exigentes como soja e milho até as hortaliças que são as mais exigentes neste nutriente (RAIJ et al., 1997; boletim técnico 100; SILVA, 2013; MALAVOLTA, 1975), o que destaca a importância de uma abordagem individualizada no manejo desse nutriente (FAGERIA; BALIGAR; CLARK, 2002).

A disponibilidade adequada de fósforo desempenha um papel crucial no desenvolvimento saudável das plantas, enquanto a deficiência ou excesso desse nutriente pode ter efeitos significativos em seu crescimento e produtividade (BERRIA, 2019). A deficiência de fósforo pode resultar em sintomas visíveis, como crescimento lento (KUMAR et al., 2017; FAO, 2017; TANDZI; MUTENGWA, 2020), folhas de coloração mais escura, queda na produção de folhas (INPI, 2010; DÍAZ et al., 2017; MOLINA et al., 2019), desenvolvimento de raízes pouco vigorosas (MINGSHOU et al., 2003; DÍAZ, 2016) e menor produção de flores e frutos (TANAKA; MASCARENHAS 1992, VENTIMIGLIA et al., 1999; MOLINA et al., 2019). Esses sinais indicam uma redução na atividade metabólica das plantas e sua capacidade de realizar processos essenciais, como fotossíntese e transporte de energia (NOVOA et al., 2018). Por outro lado, o excesso de fósforo pode levar a problemas de toxicidade, interferindo na absorção de outros nutrientes essenciais e resultando em desequilíbrios nutricionais. Além disso, o excesso de fósforo pode causar impactos ambientais negativos, como a eutrofização de corpos d'água devido ao escoamento agrícola.

### **2.3 Uso de imagens digitais na análise de solo**

As imagens digitais têm se mostrado uma ferramenta poderosa na análise de solo devido a suas diversas vantagens (MORAIS et al., 2020). Por meio de técnicas de processamento de imagem e análise computacional, é possível extrair informações detalhadas sobre as características do solo. Além disso, as imagens digitais permitem uma avaliação espacial e temporal das propriedades do solo, possibilitando identificar variações e tendências em diferentes áreas e ao longo do tempo (BRASIL et al., 2021). Essas informações são essenciais para a tomada de decisões agronômicas, como o manejo de fertilizantes, a seleção de áreas para plantio e a correção de problemas de

degradação do solo. Com o avanço das tecnologias de sensoriamento remoto e câmeras embarcadas em equipamentos agrícolas, as imagens digitais têm se tornado uma abordagem cada vez mais viável e eficiente na análise de solo (DOMINGUEZ et al., 2015; LIMA et al., 2016; MASAWAT et al., 2015; SILVA NETO et al., 2016).

A utilização de *smartphones* como ferramenta para captura de imagens na análise de solo apresenta diversas vantagens práticas e econômicas (SOUZA et al., 2019). Os *smartphones* estão amplamente disponíveis e possuem câmeras de alta resolução, o que facilita a captura de imagens de qualidade (HELFER et al., 2017; SILVA NETO et al., 2016). Além disso, os aplicativos de processamento de imagens estão se tornando cada vez mais sofisticados e acessíveis, permitindo a análise direta das imagens no próprio dispositivo (PLÁCIDO, 2017). Com o uso de *smartphones*, os agricultores e pesquisadores podem realizar a coleta de dados de forma conveniente e rápida, reduzindo a necessidade de equipamentos especializados e custos adicionais. Essa abordagem também oferece a vantagem da mobilidade, permitindo a captura de imagens em diferentes locais e em diferentes momentos do desenvolvimento das culturas, aumentando a representatividade e a precisão da análise de solo.

A análise de imagens digitais processadas como sinal analítico vem sendo utilizado como alternativa de menor custo e maior agilidade para as medições dos teores de fósforo da amostra. Vários trabalhos na literatura vêm trazendo esta abordagem (IQBAL; BJORKLUND, 2011; LAPRESTAFERNANDEZ; CAPITANVALLVEY, 2011; ZAMORA et al., 2011; ANDRADE et al., 2013; JOKERST et al., 2012). Na maioria destes métodos as imagens digitais são obtidas através de dispositivos como câmeras digitais e scanner, equipados com sensores do tipo Charge Coupled Devices (CCD) ou Complementary Metal Oxide semiconductor (CMOS) (ANDRADE et al., 2013; WONGWILAI et al., 2010).

Quando uma imagem é adquirida por meio de um dispositivo eletrônico, como uma câmera fotográfica, scanner, webcam ou *smartphone*, ocorre a conversão do sinal óptico em uma representação numérica. Essa imagem é dividida em uma grade bidimensional composta por milhares de pequenas partes chamadas pixels. A quantidade de pixels em uma imagem digital é determinante para sua fidelidade em relação à imagem real, especialmente em relação ao tamanho da imagem. Quanto maior o número de pixels, melhor será a resolução e a qualidade da imagem digital, proporcionando uma representação mais precisa do objeto fotografado (SILVA NETO et al., 2016; SANTOS, 2018).

## 2.4 Tipos de câmeras para captura de imagens

As câmeras dos smartphones têm se tornado cada vez mais avançadas, permitindo capturar imagens de alta qualidade e resolução (SILVA NETO et al., 2016). As especificações das câmeras podem variar entre os diferentes modelos de *smartphones*, mas geralmente incluem recursos como megapixels, aperture size, estabilização de imagem, HDR (High Dynamic Range), entre outros.

Os megapixels representam a quantidade de detalhes capturados pela câmera, sendo que câmeras com maior número de megapixels têm maior resolução. A aperture size controla a quantidade de luz que entra na câmera, afetando a exposição da imagem. A estabilização de imagem reduz o efeito de tremor nas imagens, resultando em fotos mais nítidas. O HDR combina várias exposições para criar uma imagem com maior faixa dinâmica. Essas características das câmeras dos *smartphones* são importantes para garantir a qualidade e a precisão das imagens capturadas.

Quando se trata da análise de solo por meio de imagens digitais, algumas propriedades das câmeras são particularmente relevantes. A resolução é um fator importante, pois determina o nível de detalhes e intensidade capturados na imagem. Quanto maior a resolução, mais precisos serão os resultados da análise. Além disso, a sensibilidade espectral da câmera é fundamental para a detecção de diferentes características do solo, como variações de cor e padrões de crescimento das plantas. As câmeras com maior sensibilidade espectral podem capturar informações em um espectro mais amplo, permitindo análises mais precisas.

## 2.5 Sistema RGB (Red, Green, Blue)

A cor é uma percepção sensorial provocada na retina do observador oriunda dos estímulos da luz em determinados comprimentos de ondas (GILCHRIST; NOBBS, 1999; BRAINARD; WILLIAMS; HOFER, 2008; CONWAY, 2009). Na interação entre a energia luminosa e o meio material, a luz que chega ao observador dando a percepção de cor, é originada de processos aditivos, subtrativos e pigmentação. No processo aditivo, o raio luminoso é formado pela combinação de dois ou mais raios luminosos com diferentes comprimentos de ondas, no subtrativo o raio luminoso é aquele que não foi absorvido quando diferentes raios luminosos são transmitidos através de um filtro (SANTOS, 2013). No processo por pigmentação os pigmentos podem absorver refletir ou transmitir a radiação luminosa (SANTOS, 2013).

Em 1931 foi criado um modelo matemático chamado de CIE-RGB pela comissão internacional de iluminação (CIEComission internationale de l'Éclairage), modelo que utiliza as cores primárias vermelha (Rred), verde (Ggreen) e azul (Bblue), a partir das diferentes possibilidades de combinações aditivas dessas cores são representadas todas as outras cores do espectro visível (POYNTON, 2003). Com esse modelo foi possível medir quantitativamente as cores e representá-las numericamente, dando os alicerces para os estudos de colorimetria (GILCHRIST; NOBBS, 1999).

O modelo RGB é representado por um cubo em coordenadas cartesianas (Figura 1), onde cada cor primária representa um dos eixos e assumem valores finitos que variam de zero (0) a um (1). O valor um (1) corresponde à intensidade máxima com que a cor primária pode ser representada no gráfico e o valor zero (0) à intensidade mínima (SANTOS, 2013).

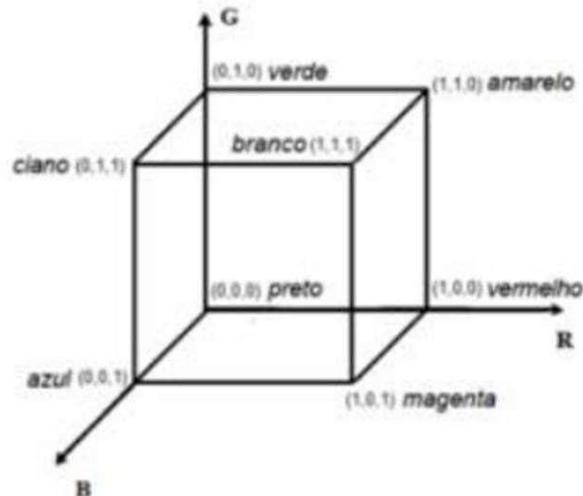


Figura 1. Cubo do modelo de cores RGB. Fonte: Santos, 2013.

Recentemente, a análise colorimétrica pôde ser feita determinando os valores RGB da imagem fotográfica digital, que fornecem resultados mais precisos e acurados (MOONRUNGSEE; PENCHAREE; JAKMUNEE, 2015). Na literatura, vários estudos vêm sendo publicados empregando imagens digitais obtidas por webcam, scanner, câmera digital e telefones com câmera para a determinação de concentrações de compostos químicos em várias áreas (MARTINEZ et al., 2008; SOLDAT; BARAK; LEPORE, 2009; KOMPANYZAREH; MANSOURIAN; RAVAAE, 2002; PACIORNIK et al., 2006; YANG et al., 2007; WONGWILAI et al., 2010; IQBAL; BJORKLUND, 2011; LAPRESTAFERNANDEZ et al., 2011; MOONRUNGSEE; PENCHAREE;

JAKMUNEE, 2015), mas esse campo analítico ainda é passível de pesquisa e de desenvolvimento.

## **2.6 Aplicação da inteligência artificial na agricultura de precisão**

A aplicação de inteligência artificial na agricultura tem se mostrado uma área promissora e inovadora. A inteligência artificial utiliza algoritmos e modelos de aprendizado de máquina para processar grandes volumes de dados agrícolas e tomar decisões baseadas em padrões identificados. Na agricultura, a inteligência artificial é aplicada em diversas áreas, como previsão de safras (ROOH; LI; ALI, 2015; DONGRE; GANDHI, 2016), monitoramento de culturas (CHIA et al., 2020; EVANS; TERHORST; KANG, 2017), detecção de doenças e pragas (PATRÍCIO; RIEDER, 2018), otimização do uso de recursos (CHUKWU, 2019), gestão de irrigação (HASHIMOTO et al., 2001; VENKATESH; THANGARAJ, 2008) e análise de solo (BITTAR et al., 2018).

O uso de inteligência artificial na tomada de decisão agrícola traz uma série de benefícios significativos. Os sistemas de inteligência artificial podem analisar dados em tempo real, fornecendo aos agricultores informações atualizadas e detalhadas sobre o estado das culturas e as condições ambientais (HUTSON, 2017; KARGAR; SHIRZADIFAR, 2013). Isso permite a otimização do uso de insumos agrícolas, como fertilizantes (VENKATESH; THANGARAJ, 2008) e pesticidas (MAHMOUD, RAFAA; RAFAA, 2008), reduzindo o desperdício e o impacto ambiental. Além disso, a inteligência artificial pode auxiliar na detecção precoce de problemas, como doenças (AMPATZIDIS; BELLIS; LUVISI, 2017) ou infestações de pragas (PERINI; SUSI, 2004), possibilitando uma resposta rápida e eficaz. No entanto, o uso da inteligência artificial também apresenta desafios, como a necessidade de infraestrutura tecnológica adequada, o acesso a dados confiáveis e a capacitação dos agricultores para utilizar e interpretar os resultados gerados pelos sistemas de inteligência artificial.

Uma das áreas da inteligência artificial é o aprendizado de máquina por meio de redes neurais artificiais.

As redes neurais são modelos computacionais inspirados no funcionamento do cérebro humano (MICHELON, 2016). Elas são compostas por neurônios artificiais interconectados que processam e transmitem informações. O aprendizado de máquina é uma área da inteligência artificial que se baseia no uso de algoritmos e modelos de rede neural para extrair padrões e conhecimentos a partir de dados (FACELI et al., 2011; MICHELON, 2016). Por meio do treinamento com conjuntos de dados, as redes neurais

são capazes de aprender a reconhecer e generalizar padrões, permitindo a tomada de decisões e previsões em novos dados (MESHRAM et al., 2021).

O treinamento de redes neurais para reconhecimento de padrões em imagens é uma aplicação comum do aprendizado de máquina. Nesse processo, a rede neural é alimentada com um conjunto de imagens previamente classificadas (ALPAYDIN, 2016). Durante o treinamento, a rede neural ajusta os pesos e as conexões entre os neurônios para aprender a associar características visuais específicas a determinadas classes ou categorias. Com o treinamento adequado, a rede neural se torna capaz de reconhecer padrões semelhantes em imagens não vistas anteriormente, permitindo a classificação automatizada de novas amostras (KAPLAN; HAENLEIN, 2019).

A aplicação do treinamento de redes neurais na agricultura de precisão é uma abordagem promissora para a detecção e a quantificação de propriedades e nutrientes do solo ou de produtividade como mencionado anteriormente. Alguns trabalhos foram desenvolvidos utilizando redes neurais para predição da produção na cultura do feijoeiro (SOARES et al., 2014), na cultura do milho (LEAL et al., 2015), na cultura de cana-de-açúcar (BOCCA, 2014), na cultura do trigo (RUB, 2009) e na cultura da soja (MICHELON, 2016).

Na análise de solo, poucos trabalhos foram desenvolvidos. Kouadio et al. (2018) utilizaram Aprendizado de Máquina Extremo, uma área da inteligência artificial para analisar as propriedades de fertilidade do solo e gerar uma estimativa precisa da produção, buscando melhor rendimento de solo em pequenas propriedades. Já Bittar et al. (2018) utilizaram Rede Neural Artificial para estimar os atributos físicos: Teor de argila, areia e silte; e atributos químicos do solo: Potencial de Hidrogênio (pH), Potássio (K), Fósforo (P), Cálcio (Ca), Magnésio (Mg), Alumínio Trocável (Al<sup>3+</sup>), Acidez Potencial (H+Al), Matéria Orgânica (OM) e Saturação de Alumínio (m %). Os autores observaram que a utilização das redes neurais artificiais se mostrou uma técnica promissora para estimar as propriedades físicas e químicas do solo, o que pode representar uma redução nos custos com análises laboratoriais.

## **2.7 Aplicativo PhotoMetrix®**

O PhotoMetrix® é um aplicativo que tem sido comumente utilizado como forma de detecção por imagens digitais, sendo uma ferramenta de análise colorimétrica móvel. O aplicativo utiliza as técnicas de correlação linear simples para análise univariada e análise de componentes principais (PCA) para análise exploratória multivariada. Os

dados da imagem são capturados pela câmera principal do dispositivo (*smartphone*) e convertidos em histogramas vermelho, verde e azul (RGB), a partir dos quais são obtidos valores numéricos de acordo com a intensidade da cor, e estes são usados para os cálculos de concentração (HELFER et al., 2017; SEVERO, 2021; BÖCK et al., 2020).

O aplicativo PhotoMetrix® foi desenvolvido por um grupo de pesquisa brasileiro, e está disponível gratuitamente no Google Play Store para *smartphones* Android, Windows e iPhone e permite a realização das medidas de forma rápida e intuitiva (HELFER et al., 2017; PLÁCIDO, 2017; BÖCK et al., 2020).

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

O presente trabalho foi realizado na Faculdade de Ciências Agrárias do Vale do Ribeira – FCAVR, localizada no município de Registro-SP. As amostras foram selecionadas aleatoriamente no banco de amostras do Laboratório de Fertilidade do Solo e Nutrição Mineral de Plantas - LAFEN, da FCAVR- Unidade Agrochá, onde também foram realizadas todas as etapas para extração e leitura do fósforo nas amostras,

Foram considerados seis tratamentos: controle (leitura do espectrofotômetro), luz natural, luz controlada 10%, luz controlada 40%, luz controlada 70% e luz controlada 100%, com 20 repetições (amostras de solo).

As leituras para determinar a concentração de fósforo nas amostras de solo foram realizadas a partir de um aplicativo para *smartphone* (PhotoMetrix®), primeiramente em um ambiente de luz natural (Figura 2) e, depois em um ambiente com luz controlada por meio de uma caixa de iluminação controlada (Figura 3), com o uso de um *dimmer* que permitiu a variação da luminosidade para estimativa da melhor intensidade de luz na determinação do fósforo pelas imagens analisadas pelo aplicativo. Para a determinação das leituras padrões para comparação, utilizou-se o espectrofotômetro.



Figura 2. Suporte para o becker de 50ml para captura de imagem na luz natural.



Figura 3. Caixa com controle de luz para a captura de imagens digitais em intensidades luminosas controladas por fita de luzes LED fixadas na tampa da caixa para o ajuste de luminosidade.

Utilizou-se amostras de produtores já coletadas e adequadamente armazenadas. Foram escolhidas 20 amostras aleatórias em uma faixa de variação do teor de P de  $5 \text{ mg dm}^{-3}$  a  $270 \text{ mg dm}^{-3}$  (Figura 4), para extração do fósforo e realização da captura das imagens e da leitura em espectrofotômetro.

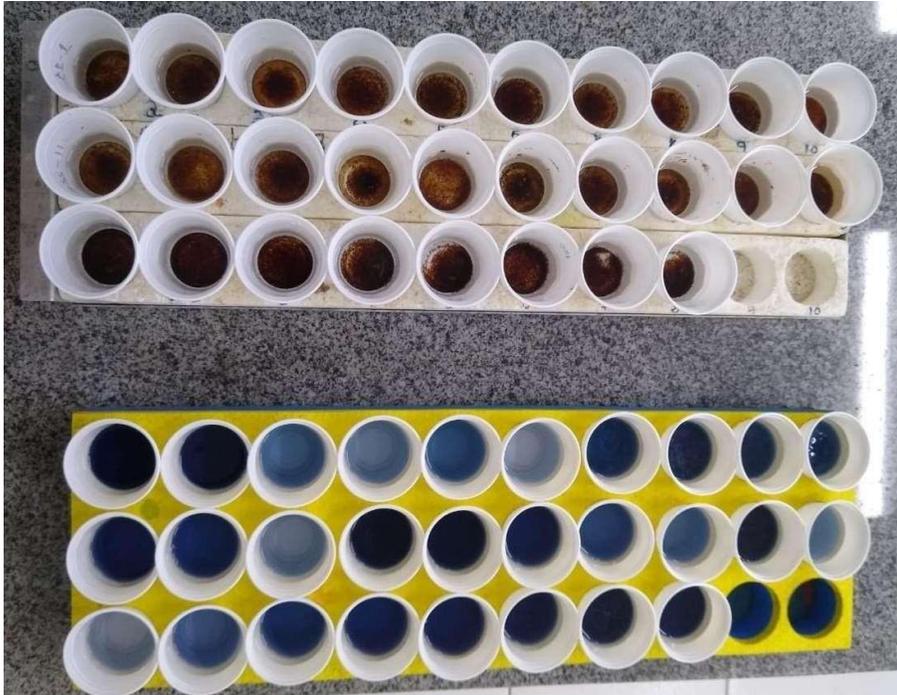


Figura 4. Amostras numa faixa de variação do teor de fósforo de  $5 \text{ mg dm}^{-3}$  a  $270 \text{ mg dm}^{-3}$  utilizados para a realização da captura das imagens e da leitura em espectrofotômetro.

### 3.1 Montagem do aparato

Foi construída uma caixa específica, em MDF, como ambiente de luz controlada para a leitura por imagens digitais, a fim de minimizar a entrada de luz externa, de modo que a amostra foi apenas iluminada por uma fita de diodos emissores de luz branca (LED) (Figura 5), a qual foi fixada na tampa da caixa preta, acima do compartimento de amostra. A tampa da caixa era removível para facilitar a trocar dos frascos de amostra a cada medição.

VLX-0093	
ITEM	FW-5050-60NW
Color	BRANCO(6000-6500K)
SMD Qty/M	60SMD
Voltage	DC12V
lumen	12LM
Power	14.4W/M
Waterproof	Waterproof-IP20
package	5M/Reel

Figura 5. Especificações da fita de diodos emissores de luz branca (LED) utilizada para confecção da caixa controladora

A fita de luz LED foi ligada a um resistor variável para que houvesse controle da intensidade da luz (Figura 6), a fim de possibilitar a variação da luz que designou os diferentes tratamentos, ou seja, as diferentes intensidades luminosas: 10%, 40%, 70% e 100% de luz na caixa controladora.



Figura 6. Resistor variável para controle da intensidade de luz dentro da caixa controladora.

Para obtenção das imagens foi colocado um suporte na parte externa da caixa para acomodar o *smartphone*, e um orifício alinhado com a câmera do celular e com o suporte do reservatório de amostra.

Dentro desta caixa, foi preparado um suporte para a fixação do frasco de amostra/padrão e um suporte em MDF forrado com etil vinil acetato (EVA) de cor branca para alocar a amostra (Figura 7) e fornecer um fundo neutro para as imagens a serem obtidas, respectivamente. Esse suporte foi posicionado a uma distância de 6 cm da parede onde estava localizado o orifício.



Figura 7. Suporte em madeira forrado com etil vinil acetato (EVA) de cor branca posicionado dentro da caixa controladora.

Como reservatórios para as amostras e padrões foram utilizados Becker de vidro com volume aproximando de 50 ml, com as dimensões: 10 mm de diâmetro externo e 4,5 cm de altura.

### **3.2 Instrumentos para comparação**

A análise colorimétrica de fósforo em solo foi feita por espectrofotometria originalmente proposto por Murphy e Riley (1962), aprimorado e otimizado por Raij e Quaggio (1983) e Facchini et al. (1994). O método baseia-se na formação de espécies de cor azul do complexo fosfoantimonilmolibdênio, em meio sulfúrico e com ácido ascórbico como redutor, sendo a intensidade da cor azul a determinante da concentração de P, ou seja, quanto mais escura a cor azul formada pelo complexo, maior é a concentração de P daquela amostra.

Nesse estudo, foi utilizado o equipamento espectrofotômetro para realizar as medições referência para comparação e análise da acurácia e precisão da leitura através do aplicativo PhotoMetrix®. As medidas foram realizadas em um espectrofotômetro Cirrus 80, UV-VIS com varredura automática 190 a 1.100 nm. O comprimento de onda para a leitura do fósforo é de 650 nm, de luz visível com lâmpada de filamento de tungstênio e halogênio. Para todas as medidas foi adaptado um suporte para se realizar as medidas com o mesmo frasco de amostra utilizado para as imagens digitais.

### **3.3 Preparo de soluções, tratamento da resina e extração do fósforo**

Para preparo de todas as soluções foi utilizado água destilada e deionizada. Inicialmente, foram preparadas as soluções de Ácido Clorídrico 1 mol L<sup>-1</sup>, Hidróxido de Sódio 1 mol L<sup>-1</sup>, Cloreto de Amônio 1 mol L<sup>-1</sup>, Bicarbonato de Sódio 1 mol L<sup>-1</sup> e Cloreto de Amônio 0,8 mol L<sup>-1</sup>.

Para preparação e manutenção da mistura de resinas trocadoras de íons (RAIJ; QUAGGIO, 2001), foi realizada o pré-condicionamento da resina, na qual sua função é a expansão das resinas, que ocorre em soluções de eletrólitos. Isso porque resinas trocadoras de íons, usadas sem pré-condicionamento, tendem a fornecer resultados não reprodutíveis (HELFFERICH, 1962). O procedimento descrito permitiu saturar os sítios internos das resinas que podem reter íons de maneira irreversível. Uma vez colocadas em solução, as resinas nunca mais podem ser secas.

Após o pré-condicionamento, foi realizada o tratamento da resina para uso. A resina deve ser usada imediatamente. É conveniente iniciar o preparo da resina na véspera, para que o tratamento com bicarbonato de sódio possa ser feito com o devido tempo. Recomenda-se iniciar a lavagem com água no fim da tarde, regulando a vazão para que ela se prolongue durante a noite e concluindo-a na manhã seguinte (RAIJ; QUAGGIO, 1983).

Após o uso da resina, é necessário recuperá-la. Procedeu-se com o recolhimento da resina utilizada em um béquer, lavou-se cinco vezes com água, descartando o líquido sobrenadante, inclusive os detritos orgânicos de solos e os fragmentos de resina. Transferiu-se a resina usada de um béquer para outro, com auxílio de um jato de água, de forma que a areia permaneceu na parte inferior do primeiro béquer. Recomenda-se acumular a resina durante vários dias para a realização da fase de recuperação apenas uma vez por semana (RAIJ; QUAGGIO, 2001). A resina, assim tratada, foi

acondicionada em um frasco rotulado, com a designação de “resina recuperada”, estando pronta para ser submetida ao tratamento para uso.

Uma solução estoque de  $40 \text{ mg L}^{-1}$  de P foi preparada a partir da dissolução de 2,5022 g de carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) p.a., 0,1216 g de magnésio metálico (Mg) p.a., 0,1757 g de diidrogenofosfato de potássio ( $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ) p.a. e 0,1275 g de cloreto de potássio (KCl) p.a., utilizando 70 ml de HCL  $\text{mol L}^{-1}$ , para completar 1 litro em balão volumétrico será utilizado solução  $0,8 \text{ mol L}^{-1}$  de  $\text{NH}_4\text{Cl}$  e  $0,2 \text{ mol L}^{-1}$  de HCl.

Soluções de padrões de concentrações, para construção da curva para calibração do equipamento de leitura, foram preparados diluindo 0, 1, 2, 3, 4 e 5 ml da solução-estoque em balões volumétricos de 50 ml. Para completar os volumes foi utilizado a solução de  $\text{NH}_4\text{Cl}$   $0,8 \text{ mol L}^{-1}$  em HCl  $0,2 \text{ mol L}^{-1}$ .

Uma solução estoque de molibdato foi preparada dissolvendo 20g de molibdato de amônio em 200mL de água a 60-70°C. Após o resfriamento foi dissolvido 2,73g de tartarato de antinômio e potássio na solução de molibdato e adicionado lentamente 230 ml de ácido sulfúrico concentrado p.a. A solução foi transferida para balão volumétrico de 1L e completado com água.

Outra solução diluída de molibdato foi preparada transferindo 50mL da solução estoque de molibdato para um balão volumétrico de 1L e adicionado cerca de 500 ml de água. Foi dissolvido, à parte, em um béquer com cerca de 100 ml de água quente (60-70°C), 0,6 g de gelatina p.a. Essa solução foi transferida para um balão volumétrico. Foi acrescentado ainda 5 g de ácido ascórbico previamente dissolvido em água, o volume do balão foi completado, homogeneizado e reservado para uso.

A extração do fósforo foi preparada transferindo  $2,5 \text{ cm}^3$  das amostras de solo para copos descartáveis de 80 ml. Em cada copo com as respectivas amostras de solo, adicionou-se 25 ml de água destilada e uma bolinha de vidro. As amostras foram agitadas em uma mesa agitadora por 15 minutos a uma velocidade de 220 rpm, visando à desagregação do solo. Após o tempo de agitação, as bolinhas de vidro foram removidas de todas as amostras. Em seguida, acrescentou-se  $2,5 \text{ cm}^3$  de resina recuperada e tratada em todas as amostras, que foram agitadas novamente por mais 16 horas na mesma velocidade anteriormente utilizada. Após as 16 horas de agitação, a resina das amostras foi lavada com o mínimo de água necessário, apenas para a remoção da argila. A resina lavada foi transferida para um copo descartável de 100 ml e adicionou-se 50 ml de solução de  $\text{NH}_4\text{Cl}$   $0,8 \text{ mol L}^{-1}$  em HCl  $0,2 \text{ mol L}^{-1}$ .

Para a determinação do fósforo foi diluído 8 ml do extrato das resinas obtido com a solução  $\text{NH}_4\text{Cl}$   $0,8 \text{ mol L}^{-1}$  em  $\text{HCl}$   $0,2 \text{ mol L}^{-1}$  com 32 ml da solução diluída de molibdato. Foi realizado o mesmo procedimento para as soluções padrão descritas anteriormente. Após 15 minutos foram realizadas as leituras no comprimento de onda de 720 nm ou de 885 nm. A cor ficou estável por algumas horas.

### 3.4 Coleta de dados – PhotoMetrix®

Na interface principal do aplicativo (Figura 8A), no idioma inglês, incluem opções de análise univariada, análise multivariada, configuração e informações sobre o aplicativo. A análise univariada, a qual foi utilizada no presente trabalho, permite ao usuário, após acessá-la (Figura 8B), executar as opções de calibração, amostragem, procurar uma análise previamente salva ou ajuda (PLÁCIDO, 2017; SANTOS, 2021).

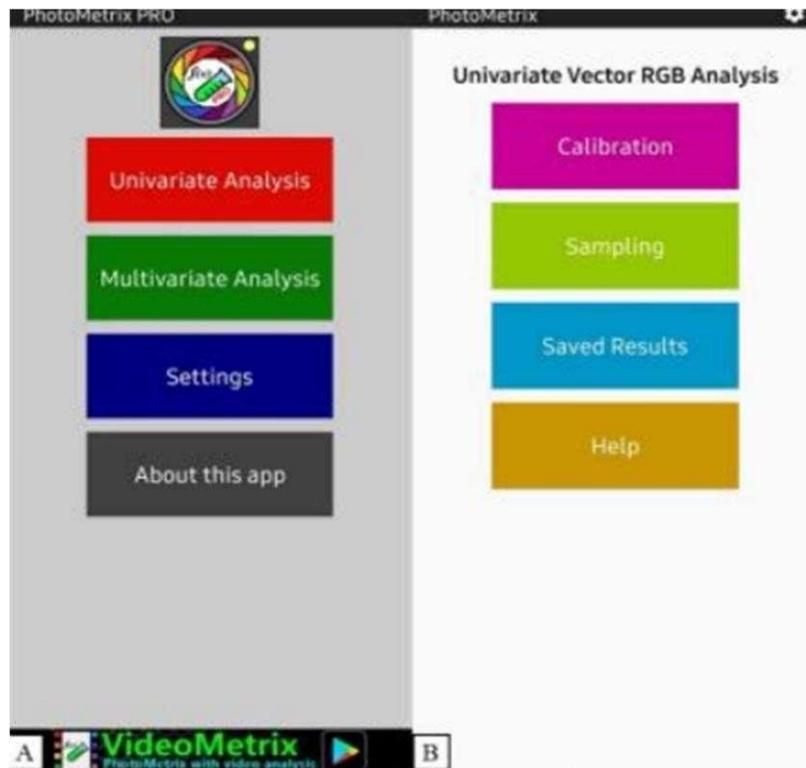


Figura 8. Telas do aplicativo PhotoMetrix®

Ao acessar a opção Calibration, o usuário deve adicionar o número de padrões desejados para a construção da curva analítica (Figura 9). Após isso, o usuário deve indicar a concentração do padrão a ser medido para então realizar a medida colorimétrica da solução que já deve estar devidamente posicionada no aparato. No caso, para a realização das leituras neste trabalho, utilizou-se 6 pontos para a curva,

sendo eles 0, 16, 32, 48, 64 e 80 mg dm<sup>-3</sup> sendo calibrada 5 curvas no aplicativo, para cada diferente intensidade de luz (luz natural, luz controlada 10%, 40%, 70% e 100%). Terminada as medidas individuais de cada padrão, o aplicativo lista os resultados para as calibrações lineares obtidas com diferentes parâmetros de imagem (RGB, HSV, HSL e HSI). A calibração escolhida para este trabalho, foi pelo Vetor RGB.

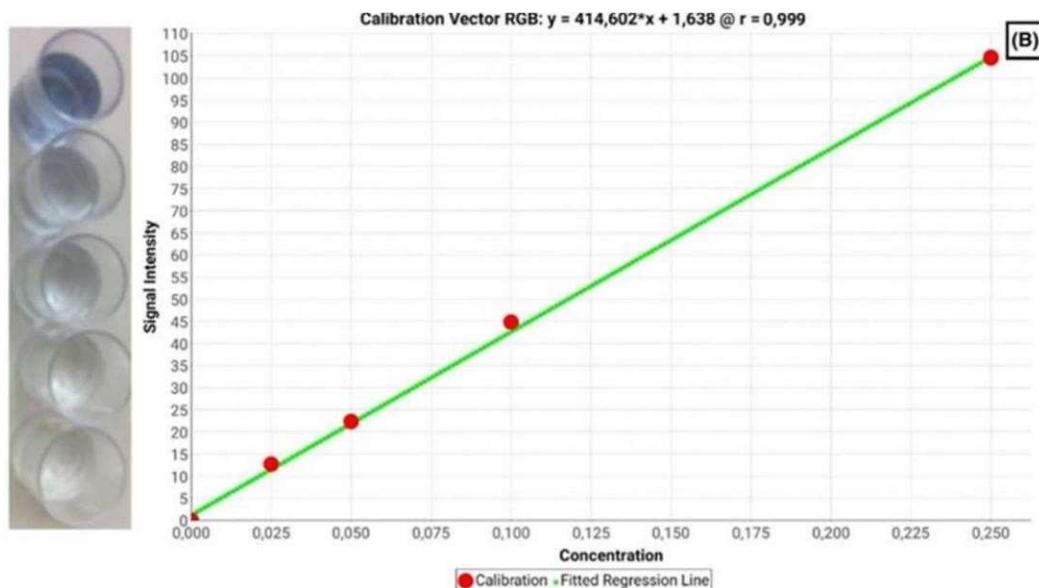


Figura 9. Exemplo da curva analítica construída para determinação da concentração de fósforo em amostras de água natural e tratada, utilizando o aplicativo PhotoMetrix®  
Fonte: Pappis et al. (2019).

Finalizada a calibração, o usuário pode realizar a medida da concentração na amostra a partir de um modelo de calibração previamente selecionado. Nesse caso, realizou-se pela função Sampling a medida da concentração de P em mg dm<sup>-3</sup> das 20 amostras selecionadas, sendo repetida 5 vezes, cada vez com um modelo de calibração respectivo a condição de luz de cada tratamento em questão, capturando as imagens de forma semelhante a realizada com os padrões. O aplicativo forneceu ao final da leitura a concentração do analito nas amostras diluídas. Os celulares equipados com câmeras fotográficas que foram utilizados para as medições foram da marca Motorola G7 Power e iPhone XR, suas especificações de câmera(s) traseira e tela estão descritos na tabela 1.

Tabela 1. Especificações da câmera traseira e da tela dos *smartphones* utilizados para as capturas de imagens

	<b>Motorola G7 Power</b>	<b>iPhone XR</b>
<b>Câmera</b>		
<i>Megapixel</i>	12 Mp	12 Mp
<i>Resolução</i>	4.000 x 3.000 pixels	4.608 x 2.592 pixels
<i>Aperture Size</i>	F 2	F 1.8
<i>Estabilidade</i>	Digital	Ótica
<b>Tela</b>		
<i>Resolução</i>	720 x 1.520 pixel	828 x 1.792 pixel
<i>Densidade de pixels</i>	270 ppi	326 ppi

### 3.5 Análises Estatísticas

Para comparação e verificação da precisão das leituras realizadas pelo aplicativo, foi aplicada Análise de Variância (ANOVA) e Análise de Regressão (correlação) para delineamento inteiramente ao acaso, sendo considerado as leituras realizadas pelo espectrofotômetro e as leituras realizadas pelo aplicativo como tratamentos. Em caso de efeito significativo, foi aplicado o teste de Tukey ( $P < 0,05$ ). Foi aplicado o teste Dunnett ( $P < 0,05$ ) para contraste de médias das leituras do aplicativo em luz natural e diferentes intensidades de luz controladas e a leitura do espectrofotômetro.

Para avaliação dos dados foram avaliados o conjunto com e sem amostras acima de  $100\text{mg dm}^{-3}$  (outliers).

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

De forma geral, os resultados indicaram uma limitação nos dois *smartphones* utilizados na captura de imagens, conforme demonstrado na Tabela 2. Verificou-se que, quando a concentração de fósforo no solo ultrapassava  $100 \text{ mg dm}^{-3}$ , o aplicativo PhotoMetrix® apresentava uma limitação na leitura das imagens capturadas pelos dispositivos. A concentração máxima observada foi de  $82,21 \text{ mg dm}^{-3}$  para as imagens capturadas pelo Motorola e de  $49,15 \text{ mg dm}^{-3}$  para as imagens capturadas pelo iPhone. Essas diferenças significativas entre os tratamentos podem ser atribuídas às limitações técnicas dos dispositivos na captação e interpretação das imagens. No entanto, ao excluir os pontos de observação acima de  $100 \text{ mg dm}^{-3}$  de concentração de fósforo da análise de dados, não foram observadas diferenças significativas ( $P > 0,05$ ) entre os tratamentos, tanto na análise de variância quanto no teste de Tukey.

Quanto ao contraste de médias das concentrações de fósforo nas amostras de solo determinadas pelas leituras no aplicativo Photometrix®, utilizando o teste de Dunnett, foram encontradas diferenças significativas ( $P < 0,05$ ) em relação ao controle (espectrofotômetro) apenas quando as amostras acima de  $100 \text{ mg dm}^{-3}$  foram considerados para a análise (Tabela 2). No caso dos dados sem amostras acima de  $100 \text{ mg dm}^{-3}$ , para ambos os *smartphones*, não foi observado diferenças significativas em relação ao espectrofotômetro ( $P > 0,05$ ).

**Tabela 2.** Médias de concentração de fósforo em  $\text{mg dm}^{-3}$  em solos obtidos por espectrofotômetro (controle) e pelo aplicativo Photometrix® em diferentes intensidades de luz.

Tratamentos	Motorola c/ amostras acima de $100 \text{ mg dm}^{-3}$	Motorola s/ amostras acima de $100 \text{ mg dm}^{-3}$	iPhone c/ amostras acima de $100 \text{ mg dm}^{-3}$	iPhone s/ amostras acima de $100 \text{ mg dm}^{-3}$
	Concentração de fósforo ( $\text{mg dm}^{-3}$ )			
Luz natural	49,64bB	32,29aA	30,91bB	24,85aA
luz controlada 10%	46,71bB	30,54aA	29,29bB	20,12aA
luz controlada 40%	50,51bB	34,40aA	31,97bB	23,23aA

luz controlada 70%	47,52bB	34,40aA	31,93bB	24,29aA
luz controlada 100%	49,20bB	35,11aA	33,18bB	25,86aA
Espectrofotômetro	90,75aA	30,74aA	86,00aA	34,00aA
CV (%)	76,78	73,99	85,17	76,06
F trat.	3,24**	0,081 <sup>NS</sup>	8,34**	0,70 <sup>NS</sup>

Letras minúsculas diferentes na mesma coluna indicam diferença significativa entre os tratamentos pelo teste de Tukey ( $P < 0,5$ ); Letras maiúsculas diferentes na mesma coluna indicam diferença significativa entre o tratamento com o controle (espectrofotômetro) pelo teste de Dunnett ( $P < 0,5$ ); \*\* Diferença significativa ao nível de 1% entre os tratamentos pela Análise de Variância; NS Diferença não significativa entre os tratamentos pela Análise de Variância.

Essas observações indicam que, embora o aplicativo PhotoMetrix<sup>®</sup> possa fornecer resultados próximos aos obtidos pelo espectrofotômetro, é importante considerar as limitações dos *smartphones* e as variações nas condições de iluminação ao interpretar as leituras de concentração de fósforo.

Os resultados de regressão e correlação para as leituras realizadas com os *smartphones* Motorola e iPhone, considerando a presença das amostras acima de  $100 \text{ mg dm}^{-3}$ , revelaram associações moderadas entre as leituras de concentração de fósforo e os valores de referência. No caso do *smartphone* Motorola (Figura 10), observou-se uma correlação positiva e moderada para todas as condições de iluminação, com valores de correlação variando entre 0,703 e 0,805, e coeficientes de determinação ( $R^2$ ) entre 0,495 e 0,648. No entanto, os resultados do *smartphone* iPhone (Figura 12) mostraram correlações mais baixas, variando entre 0,642 e 0,745, com  $R^2$  entre 0,413 e 0,558. Esses resultados indicam que, na presença das amostras acima de  $100 \text{ mg dm}^{-3}$ , as leituras realizadas pelo *smartphone* Motorola apresentaram uma associação ligeiramente mais significativa com os valores de referência em comparação ao iPhone.

Por outro lado, após a exclusão das amostras acima de  $100 \text{ mg dm}^{-3}$ , os dados de correlação e  $R^2$  para ambas as marcas de *smartphones* apresentaram melhorias significativas. Para o *smartphone* Motorola (Figura 11), os valores de correlação aumentaram consideravelmente, variando entre 0,933 e 0,984, com  $R^2$  entre 0,87 e 0,97, se assemelhando ao estudo de Moraes et al. (2018) que avaliaram a utilização do aplicativo Photometrix<sup>®</sup> para quantificação da amônia volatilizada. Isso sugere uma associação mais forte entre as leituras de concentração de fósforo e os valores de referência, proporcionando uma estimativa mais precisa da concentração do elemento no solo. Da mesma forma, para o *smartphone* iPhone (Figura 13), os valores de correlação também aumentaram, variando entre 0,760 e 0,890, com  $R^2$  entre 0,578 e

0,7912. Esses resultados indicam uma melhora na associação entre as leituras realizadas pelo iPhone e os valores de referência, aproximando-se dos resultados obtidos com o *smartphone* Motorola.

De forma geral, a captura de imagens pelo Motorola G7 Power apresentou resultados mais satisfatórios. O iPhone, com sua câmera de alta resolução e funcionalidades de correção de coloração e iluminação das imagens, pode ter influenciado no processamento das imagens pelo aplicativo. Essas diferenças tecnológicas podem explicar as variações nos coeficientes de correlação observados em diferentes estudos, como demonstrado por Saquetti (2021) ao avaliar o uso do aplicativo Photometrix® em *smartphones* iPhone 11 e Moto G.

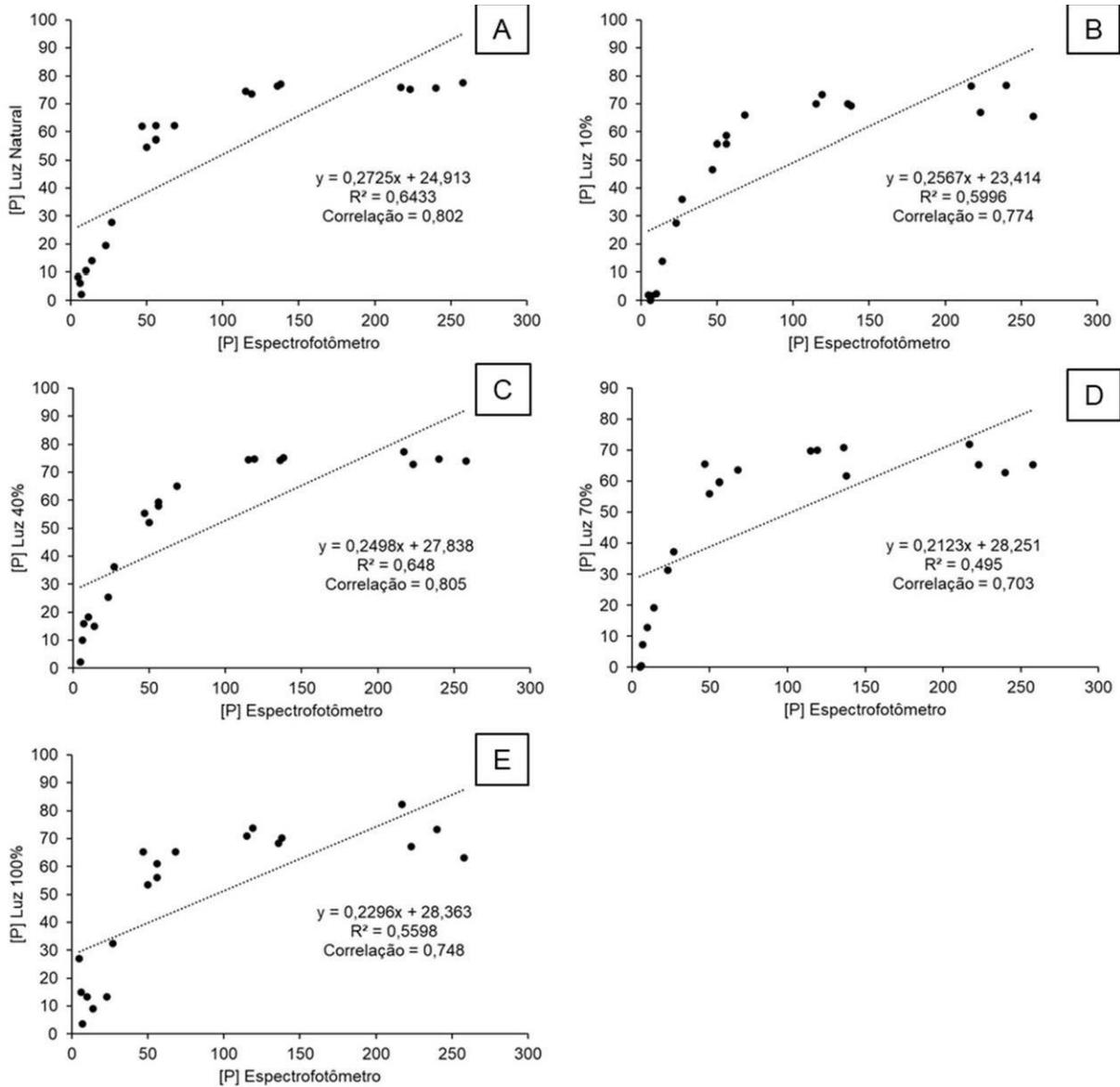


Figura 10. Regressão linear (com amostras acima de  $100\text{mg dm}^{-3}$ ) entre as concentrações de fósforo medidos pelo espectrofotômetro (eixo X), e medidos pelo aplicativo Photometrix<sup>®</sup> de imagens capturas por *smartphone* Motorola G7 Power, em luz natural (A); luz controlada 10% (B); luz controlada 40% (C); luz controlada 70% (D) e luz controlada 100% (E).

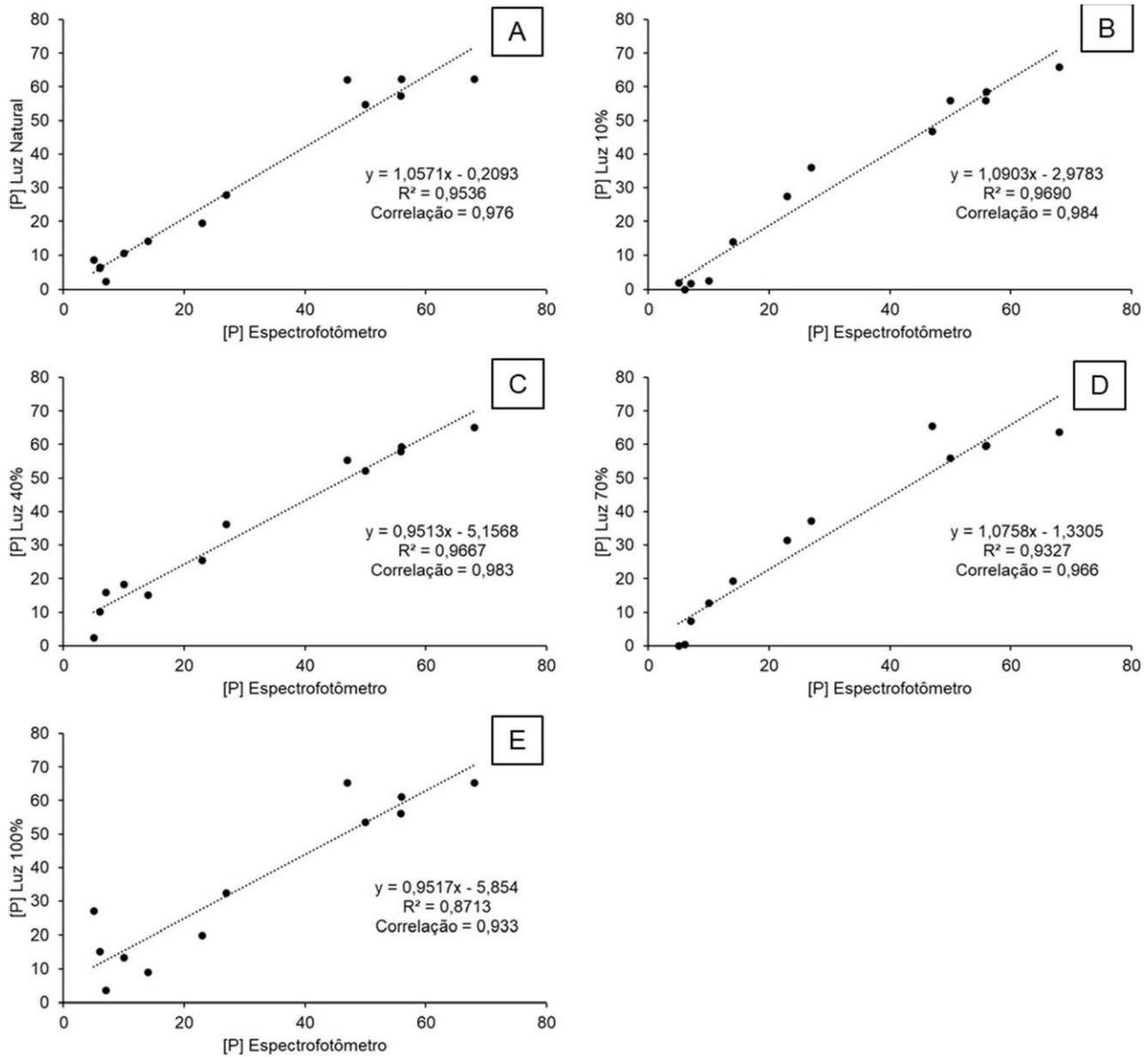


Figura 11. Regressão linear (sem amostras acima de  $100\text{mg dm}^{-3}$ ) entre as concentrações de fósforo medidos pelo espectrofotômetro (eixo X), e medidos pelo aplicativo Photometrix<sup>®</sup> de imagens capturas por *smartphone* Motorola G7 Power, em luz natural (A); luz controlada 10% (B); luz controlada 40% (C); luz controlada 70% (D) e luz controlada 100% (E).

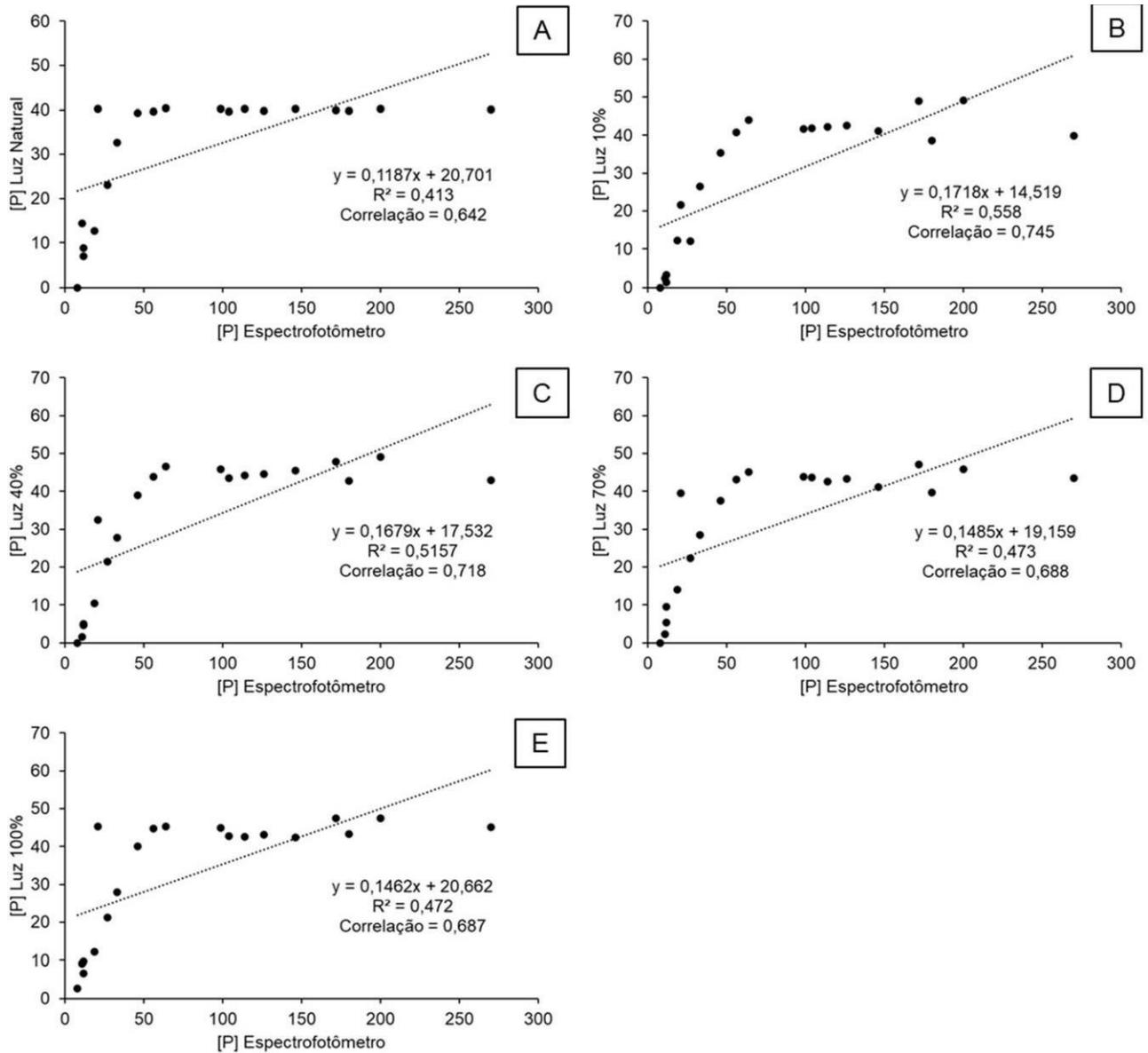


Figura 12. Regressão linear (com amostras acima de  $100\text{mg dm}^{-3}$ ) entre as concentrações de fósforo medidos pelo espectrofotômetro (eixo X), e medidos pelo aplicativo Photometrix<sup>®</sup> de imagens capturas por *smartphone* iPhone XR, em luz natural (A); luz controlada 10% (B); luz controlada 40% (C); luz controlada 70% (D) e luz controlada 100% (E).

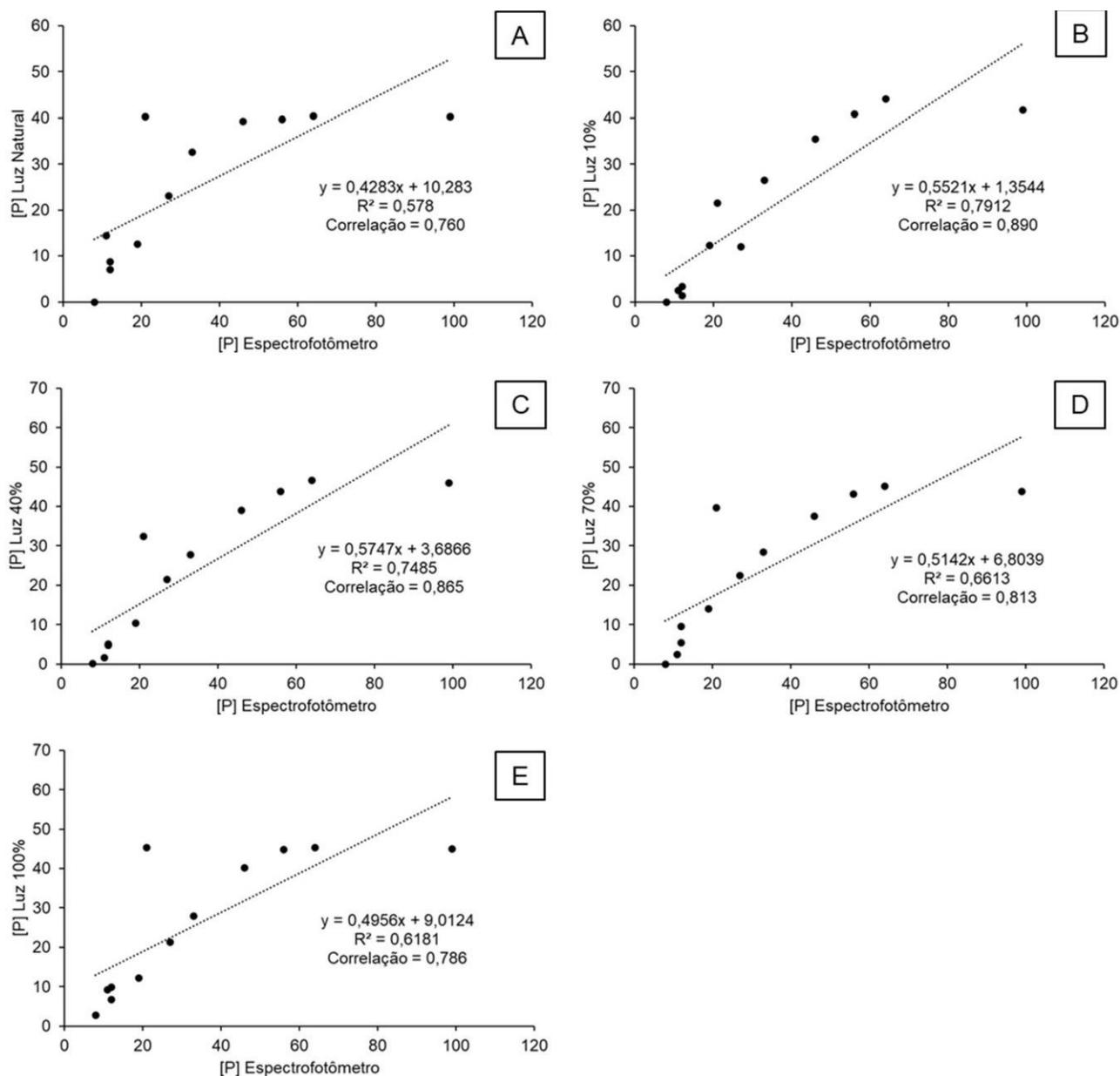


Figura 13. Regressão linear (sem amostras acima de  $100\text{mg dm}^{-3}$ ) entre as concentrações de fósforo medidos pelo espectrofotômetro (eixo X), e medidos pelo aplicativo Photometrix<sup>®</sup> de imagens capturas por *smartphone* iPhone XR, em luz natural (A); luz controlada 10% (B); luz controlada 40% (C); luz controlada 70% (D) e luz controlada 100% (E).

Ao analisar os dados das leituras realizadas nos diferentes níveis de intensidade de luz, apesar de não terem apresentado diferença estatística ( $P > 0,05$ ) entre as leituras apresentadas na Tabela 2, constatou-se que o *smartphone* Motorola demonstrou correlações e coeficientes de determinação ( $R^2$ ) mais altos na intensidade de 40% de

luz. Essas condições proporcionaram uma associação mais forte entre as leituras de concentração de fósforo nesta intensidade de luz e os valores de referência (espectrofotômetro). Por outro lado, para o iPhone, a intensidade de 10% de luz demonstrou a maior correlação e  $R^2$ . Nas análises sem as amostras acima de  $100\text{mg dm}^{-3}$ , a intensidade de 40% de luz continuou apresentando o maior valor de correlação e  $R^2$  para o Motorola junto com a intensidade de 10% de luz, enquanto para o iPhone, a intensidade de 10% de luz também continuou apresentando os maiores valores de correlação e  $R^2$ . Porém, é importante ressaltar que a intensidade de 100% de luz resultou nos piores valores de correlação e  $R^2$  tanto para o Motorola quanto para o iPhone.

## 5. CONCLUSÃO

As leituras de concentração de fósforo realizadas com os smartphones Motorola G7 Power e iPhone XR apresentaram associações significativas com os valores de referência.

Concluiu-se que os aparelhos possuem uma limitação para identificar amostras com concentração de P acima de  $100\text{mg dm}^{-3}$ , porém se levado em consideração essa limitação, é possível quantificar o P nas amostras a partir do processamento de imagens pelo aplicativo Photometrix®.

Para o smartphone Motorola G7 Power a melhor correlação frente ao método de referência, para as amostras abaixo de  $100\text{ mg dm}^{-3}$ , foi para as imagens capturadas em caixa de luz controlada por LED com intensidades luminosas de 40% e para o Iphone, foi em caixa de luz controlada por LED com a intensidade de 10%, indicando as melhores condições para aquisição das imagens para cada dispositivo.

Para validar o método para culturas mais exigentes em fósforo, é necessário novos estudos na área para entender e reduzir a limitação na identificação de concentrações mais elevadas de P.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALPAYDIN, E. **Machine learning: the new ai**. Cambridge, MA: MIT Press, 2016.
- AMPATZIDIS, Y.; BELLIS, L.; LUVISI, A. iPathology: Robotic applications and management of plants and plant diseases. **Sustainability**, v. 9, n. 6, p. 1-14, 2017.
- ANDRADE, S. I. E.; LIMA, M. B.; BARRETO, I. S.; LYRA, W. S.; ALMEIDA, L. F.; ARAÚJO, M. C. U.; SILVA, E. C. A digital image based flowbatch analyzer for determining Al (III) and Cr(VI) in water. **Microchemical Journal**, v. 109, p. 106-111, 2013. doi: 10.1016/j.microc.2012.03.029.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR 12772: **Determinação de fósforo**, Rio de Janeiro, 1992. p.18.
- BERRIA, R. J. M. **Adubação sistêmica e modos de aplicação de fósforo na produtividade de soja**. 37p. 2019. Monografia (Graduação em Agronomia), Universidade Tecnológica Federal do Paraná.
- BITTAR, R. D.; ALVES, S. M. F.; MELO, F. R. Estimation of physical and chemical soil properties by artificial neural networks. **Revista Caatinga**, v. 31, n. 3, p. 704-712, 2018.
- BOCCA, F. F. **Produtividade de cana-de-açúcar: caracterização dos contextos de decisão e utilização de técnicas de mineração de dados para modelagem**. 98 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) — Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas (UNESP), Campinas, 2014.
- BÖCK, F. C.; HELFER, G. A.; COSTA, A. B.; DESSUY, M. B.; FERRÃO, M. F. PhotoMetrix and colorimetric image analysis using smartphones. **Journal of Chemometrics**, e3251, 2020
- BRAINARD, D. H.; WILLIAMS, D. R.; HOFER, H. Trichromatic reconstruction from the interleaved cone mosaic: Bayesian model and the color appearance of small spots. **Journal of Vision**, v. 8, n. 5, p. 15 123, 2008. doi: 10.1167/8.5.15.
- BRASIL, N. M. Q. X.; BRASIL NETO, A. B.; PAUMGARTTEN, A. E. A.; SILVEIRA, J. M. Q. X.; SILVA, A. A. Análise multitemporal da cobertura do solo do Parque Estadual do Utinga, Belém, Pará. **Brazilian Journal Development**, v. 7, n. 4, p. 36109-36118, 2021.

- CHIA, M. Y. et al. Recent Advances in Evapotranspiration Estimation Using Artificial Intelligence Approaches with a Focus on Hybridization Techniques-A Review. **Agronomy**, v. 10, n. 1, p. 101, 2020.
- CHUKWU, N. C. E. Applications of artificial intelligence in agriculture: A review. **Engineering. Technology & Applied Science Research**, v. 9, n. 4, p. 4377-4383, 2019.
- CONWAY, B. R. Color vision, cones, and colorcoding in the cortex. **Neuroscientist**, v. 15, n. 3, p. 27490, 2009. doi: 10.1177/1073858408331369.
- CUNHA, J. F.; CASARIN, V.; PROCHNOW, L. I. Balanço de nutrientes na agricultura brasileira. **Informações Agronômicas**, v. 135, p. 1-11, 2010.
- CUNHA, J. F.; CASARIN, V.; PROCHNOW, L. I. Balanço de nutrientes na agricultura brasileira no período de 1988 a 2010. **Informações Agronômicas**, v. 19, p. 1-7, 2011.
- CUNHA, J. F.; FRANCISCO, E. A. B.; PROCHNOW, L. I. Balanço na agricultura brasileira no período de 2013 a 2016. **Informações Agronômicas**, v. 162, n. 19, p. 3-14, 2018.
- DÍAZ, A. S. **Formação de aerênquima e fisiologia de dois genótipos de milho sob diferentes concentrações de fósforo e disponibilidade hídrica**. 2016. 62 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Lavras, 2016.
- DÍAZ, L.F., DÁVALOS, P.A., JOFRE, A.E., MARTÍNEZ, T.O. **Fresa, deficiencias y síntomas nutricionales “una guía visual para fertilizar”**. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias, Centro de Investigación Regional Centro Campo Experimental Bajío Celaya, Guanajuato, México, 2017, 34 p.
- DOMINGUEZ, M. A.; CENTURIÓN, M. E. Application of digital images to determine color in honey samples from Argentina. **Microchemical Journal**, v. 118, p. 110–114, 2015.
- DONGRE, V. B.; GANDHI, R. S. Applications of artificial neural networks for enhanced livestock productivity: A review. **Indian Journal of Animal Sciences**, v. 86, n. 11, p. 1232-1237, 2016.
- EVANS, K. J.; TERHORST, A.; KANG, B. H. From Data to Decisions: Helping Crop Producers Build Their Actionable Knowledge. **Critical Reviews in Plant Sciences**, v. 36, n. 2, p. 71-88, 2017.

- FAO. **The state of food insecurity in the world**. Rome, 2014. Disponível em: <https://www.fao.org/3/i4030e/i4030e.pdf>. Acesso em: 26 jun. 2023.
- FACELI, K.; LORENA, A. C.; GAMA, J.; CARVALHO, A. C. P. L. **Inteligência Artificial: Uma abordagem de aprendizado de máquina**. 1. ed. Rio de Janeiro: LTC, p. 378, 2011.
- GILCHRIST, A.; NOBBS, J. Colorimetry, Theory. In: L. EditorinChief: john (Ed.). **Encyclopedia of Spectroscopy and Spectrometry**. Second Edition. Oxford: Academic Press, 1999. p. 380385.
- GRANT, C. A.; FLATEN, D. N.; TOMASIEWICZ, D. J.; SHEPPARD, S. C. A importância do fósforo no desenvolvimento inicial da planta. **Informações agronômicas**, v. 95, n. 1, 2001.
- HASHIMOTO, Y. et al. Intelligent systems for agriculture in Japan. **IEEE Control Systems Magazine**, v. 21, n. 5, p. 71-85, 2001.
- HELPER, G. A.; MAGNUS, V. S.; BÖCK, F. C.; TEICHMANN, A.; FERRÃO, M. F.; COSTA, A. B. PhotoMetrix: An Application for Univariate Calibration and Principal Components Analysis Using Colorimetry on Mobile Devices. **Journal Brazilian Chemical Society**, v. 28, n. 2, p. 328-335, 2017. doi: 10.5935/0103-5053.20160182.
- HELFFERICH, F. **Ion Exchange**. New York: McGraw-Hill, 1962. 624p.
- HUTSON, M. AI Glossary: Artificial intelligence, in so many words. **Science**, v. 357, n. 6346, p. 19-19, 2017.
- IPNI (International Plant Nutrition Institute). **Funciones del fosforo en las plantas**. Informaciones Agronomicas No. 36. IPNI, Peachtree Corners, GA, USA. 2010.
- IQBAL, Z; BJORKLUND, R. B. Assessment of a mobile phone for use as a spectroscopic analytical tool for foods and beverages. **International Journal of Food Science and Technology**, v. 46, n. 11, p. 24282436, 2011. doi: 10.1111/j.1365-2621.2011.02766.x.
- JOKERST J. C.; ADKINS J. A.; BISHA B.; MENTELE M. M.; GOODRIDGE L. D.; HENRY C. S. Development of a PaperBased Analytical Device for Colorimetric Detection of Select Foodborne Pathogens. **Analytical Chemistry**, v. 84, n. 6, p. 29002907, 2012. doi: 10.1021/ac203466y.

KAPLAN, A.; HAENLEIN, M. Siri, Siri, in my hand: Who's the fairest in the land? On the interpretations, illustrations, and implications of artificial intelligence. *Business Horizons*, Amsterdam, v. 62, n. 1, p. 15-25, 2019.

KARGAR, A. H. B.; SHIRZADIFAR, A. M. Automatic weed detection system and smart herbicide sprayer robot for corn fields. In: 2013, Tehran. **2013 First RSI/ISM International Conference on Robotics and Mechatronics (ICRoM)**. Tehran: IEEE, 2013. p. 468-473.

KOMPANYZAREH, M; MANSOURIAN, M.; RAVAEE, F. Simple method for colorimetric spottest quantitative analysis of Fe (III) using a computer controlled handscanner. *Analytica Chimica Acta*, v. 471, n. 1, p. 97104, 2002. doi: 10.1016/S0003-2670(02)00871-1.

KOUADIO, L. et al. Artificial intelligence approach for the prediction of Robusta coffee yield using soil fertility properties. *Computers and Electronics in Agriculture*, Amsterdam, v. 155, n. April, p. 324-338, 2018.

KUMAR, S.; VERMA, S.; TRIVEDI, P. K. Involvement of small RNAs in phosphorus and sulfur sensing, signaling and stress: current update. *Frontiers in Plant Science*, v. 8, article 285, 2017.

LAPRESTAFERNANDEZ, A.; CAPITANVALLVEY, L. F. Environmental monitoring using a conventional photographic digital camera for multianalyte disposable optical sensors. *Analytica Chimica Acta*, v. 706, n. 2, p. 328337, 2011. doi: 10.1016/j.aca.2011.08.042.

LEAL, A. J. F.; MIGUEL, E. P.; BAIO, F. H. R.; NEVES, D. de C.; LEAL, U. A. S. Redes neurais artificiais na predição da produtividade de milho e definição de sítios de manejo diferenciado por meio de atributos do solo. *Bragantia*, Campinas, v. 74, n. 4, p. 436-444, 2015.

LIMA, R. A. C. et al. Digital movie-based on automatic titrations. *Talanta*, v. 147, p. 226-232, 2016.

MAHMOUD, M.; M RAFEHA, M.; A RAFEHA, A. Using expert systems technology to increase agriculture production and water conservation. **3rd International Conference on Digital Information Management**, ICDIM 2008, p. 1-7, 2008.

MALAVOLTA, C.; HAAG, H. P.; MELO, F. A. F. **Nutrição mineral e adubação de plantas cultivadas**. São Paulo: Pioneira, 752p, 1975.

MARTINEZ, A. W.; PHILLIPS, S. T.; CARRILHO, E.; THOMAS, S. W.; SINDI, H.; WHITESIDES, G. M. Simple telemedicine for developing regions: camera phones and paperbased microfluidic devices for realtime, offsite diagnosis. **Analytical Chemistry**, v. 80, n. 10, p. 3699707, 2008. doi: 10.1021/ac800112r.

MASAWAT, P.; HARFIELD, A.; NAMWONG, A. An iPhone-based digital image colorimeter for detecting tetracycline in milk. **Food Chemistry**, v. 184, p. 23–29, 2015

MESHARAM, V. et al. Machine learning in agriculture domain: a state-of-a-art survey. **Artificial Intelligence in the Life Sciences**, [S.I.], v. 1, p. 100010, dec 2021.

MICHELON, G. K. **Aplicação de técnicas de inteligência artificial na agricultura de precisão para estimar a produtividade de soja**. 102p. 2016. Monografia (Graduação em Computação), Departamento Acadêmico de Computação da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

MINGSHOU, F.; ZHU, J.; BROWN, C.; LYNCH, J. Physiological roles for aerenchyma in phosphorus- -stressed roots. **Functional Plant Biology**, v. 30, n. 5, p. 493-506, 2003.

MOLINA, J. G. M.; GONZÁLEZ, L. C.; CÉSPEDES, N. Incidencia y severidad de los síntomas de deficiencia de fósforo en el cultivo de fresa en las condiciones de Pamplona, Colombia. **Centro Agrícola**, v. 46, n. 1, p. 58-61, 2019.

MOONRUNGSEE, N.; PENCHAREE, S.; JAKMUNEE, J. Colorimetric analyzer based on mobile phone camera for determination of available phosphorus in soil. **Talanta**, v. 136, p. 204-209, 2015. doi: 10.1016/j.talanta.2015.01.024.

MORAES, A. P.; MORAIS, P. A. O.; SOUZA, D. M. Uma alternativa à análise espectrofotométrica: utilização de aplicativo de Smartphone para determinação de amônia volatilizada. **Anais...** 11º Seminário Jovens Talentos. 2018. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/170728/1/page-19.pdf>. Acesso em 02 de jul 2023.

MORAIS, P. A. O.; SOUZA, D. M.; MADARI, B. E.; OLIVEIRA, A. E. Avaliando a Fertilidade do Solo com Imagens Digitais. **Revista Processos Químicos**, 2020. Disponível em: <https://repositorio.bc.ufg.br/bitstream/ri/22742/4/Artigo%20->

[%20Pedro%20Augusto%20de%20Oliveira%20Morais%20-%202020.pdf](#). Acesso em 22 de junho de 2023.

MOTOMURA, M. C. N.; FONTOURA, L. C.; KANASHIRO, M. Understanding walkable areas: applicability and analysis of a walkability index in a Brazilian city. **Ambiente Construído**, v. 18, n. 4, p. 413-425, 2018.

MURPHY, J.; RILEY, J. P. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. **Analytica Chimica Acta**, v. 27, p. 31-36, 1962. doi: 10.1016/S0003-2670(00)88444-5.

NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J. **Phosphorus in Soil and Plants in Tropical Conditions = Fósforo em Solo e Planta em Condições Tropicais**. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, Brasil, 1999.

NOVOA, M. A.; MIRANDA, D.; MELGAREJO, L. M. Efecto de las deficiencias y excesos de fósforo, potasio y boro en la fisiología y el crecimiento de plantas de aguacate (*Persea americana*, cv. Hass). **Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas**, v. 12, n. 2, p. 293-307, 2018.

PACIORNIK, S.; YALLOUZ, A. V.; CAMPOS, R. C.; GANNERMAN, D. Scanner image analysis in the quantification of Mercury using spottests. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, v. 17, n. 1, p. 156161, 2006. doi: 10.1590/S0103-50532006000100022.

PAPPIS, C.; LIBRELOTTO, M.; BAUMANN, L.; et al. Point-of-use determination of fluoride and phosphorus in water through a smartphone using the PhotoMetrix® App. **Brazilian J Anal Chem**. V. 6, n. 25, p. 1-9, 2019.

PATRÍCIO, D. I.; RIEDER, R. Computer vision and artificial intelligence in precision agriculture for grain crops: A systematic review. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 153, n. April, p. 69-81, 2018.

PAVINATO, P. S.; ROCHA, G. C.; CHERUBIN, M. R.; HARRIS, I.; JONES, D. L.; WITHERS, P. J. A. Map of total phosphorus content in native soils of Brazil. **Scientia Agricola**, v. 78, n. 6, e20200077, 2021.

PEREIRA, D. S.; COSTA, Y. K. S.; CARVALHO, L. B. O elemento P: formas e dinâmica em solos tropicais. **Revista Agronomia Brasileira**, v. 5, e-ISSN 2594-6781,

2021. Disponível em: <https://www.fcav.unesp.br/Home/ensino/departamentos/cienciasdaproducaoagricola/lab-oratoriodematologia-labmato/revistaagronomiabrasileira/rab202124.pdf>. Acesso em 14 de julho de 2023.

PERINI, A.; SUSI, A. Developing a decision support system for integrated production in agriculture. **Environmental Modelling and Software**, v. 19, n. 9, p. 821-829, 2004.

PLÁCIDO, K. M. **Avaliação do uso de imagens digitais obtidas por smartphones para determinação de amônia total em águas**. 35f. 2017. Monografia (Bacharel em Química Tecnológica). Instituto de Química, Universidade de Brasília. 2017. Disponível em: [https://bdm.unb.br/bitstream/10483/17595/1/2017\\_KatharinaMonteiroPlacido.pdf](https://bdm.unb.br/bitstream/10483/17595/1/2017_KatharinaMonteiroPlacido.pdf). Acesso em 27 dez 2021.

POYNTON C. 21 The CIE system of colorimetry. In: (Ed.). **Digital Video and HDTV**. San Francisco: Morgan Kaufmann, 2003. p. 211231.

RAIJ, B. V.; QUAGGIO, J. A. **Métodos de análise de solo para fins de fertilidade**. Campinas, Instituto Agrônomo, 1983. 31p. (Boletim técnico, 81).

RAIJ, B. V.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A.; FURLANI, A.N.C. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2.ed. Campinas:IAC, 1997. 285p. (IAC. Boletim Técnico, 100).

RAIJ, B. V.; QUAGGIO, J. A. Determinação de fósforo, cálcio, magnésio, e potássio extraídos com resina trocadora de íon. In: RAIJ, B.; ANDRADE, J. C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. (Eds.). **Análise Química para Avaliação da Fertilidade de Solos Tropicais**. Campinas, Instituto Agrônomo, 285p. 2001.

RESENDE, A. V.; FURTINI NETO, A. E. **Aspectos relacionados ao manejo da adubação fosfatada em solos do cerrado**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2007. 30p.

ROOH, U. A.; LI, A.; ALI, M. M. Fuzzy, neural network and expert systems methodologies and applications -A review. **Journal of Mobile Multimedia**, v. 11, n. 1-2, p. 157-176, 2015.

ROY, E. D.; RICHARDS, P. D.; MARTINELLI, L. A.; COLETTA, L. D.; LINS, S. R. M.; VAZQUEZ, F. F.; WILLIG, E.; SPERA, S. A.; VANWEY, L. K.; PORDER, S. The

phosphorus cost of agricultural intensification in the tropics. **Nature Plants** v. 43, p. 1-6, 2016.

RUB, G. Data mining of agricultural yield data: A comparison of regression models. In: **Proceedings of the 9th Industrial Conference on Advances in Data Mining. Applications and Theoretical Aspects**. Heidelberg: Springer-Verlag, 2009. (ICDM '09), p. 24–37.

SAQUETTI, A. P. Uso do aplicativo Photometrix para determinação de ferro em amostras de pólen e suplemento vitamínico. 35p. 2021. Relatório Estágio, Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC.

SANTOS, J. L. O. **Estratégias analíticas para determinação de nitrito e nitrato em matrizes ambientais e alimentícias, empregando análise de imagens digitais**. 131f. 2013. Dissertação (Mestrado em Química). Instituto de Química, Universidade Federal da Bahia. 2013. Disponível em: [https://repositorio.ufba.br/bitstream/ri/15799/1/DISSERTA%  
c3%87AO\\_JORGE%20LUI%20LIVEIRA%20SANTOS\\_PPGQ\\_UFBA.pdf](https://repositorio.ufba.br/bitstream/ri/15799/1/DISSERTA%c3%87AO_JORGE%20LUI%20LIVEIRA%20SANTOS_PPGQ_UFBA.pdf). Acesso em 03 jan 2022.

SANTOS, A. L. S. Determinação de fósforo total em águas superficiais com o uso de imagens digitais obtidas por smartphone. 40p. 2018. Monografia (Graduação em Química Ambiental), Universidade Federal do Tocantins.

SANTOS, A. S. S. **Determinação de fósforo total em águas superficiais com o uso de imagens digitais obtidas por Smartphone**. 39f. 2021. Monografia (Graduação em Química Ambiental), Universidade Federal do Tocantins, Gurupi, 2021. Disponível em: <http://repositorio.uft.edu.br/bitstream/11612/3118/1/Alisson%20Soares%20de%20Souza%20Santos..pdf>. Acesso em 27 dez 2021.

SEVERO, E. A. **Desenvolvimento de spot test para determinação de fósforo em solos com quantificação por imagem digital**. 43f. 2021. Monografia (Licenciatura em Química). Universidade Tecnológica Federal do Paraná. 2021. Disponível em: <http://riut.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/26035/1/spottestfosforosolos.pdf>. Acesso em 03 jan 2022.

SILVA, A. S. N. **Doses de fósforo e potássio na produção da alfaca**. 2013. 50p Tese (Doutorado em Agronomia), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias.

- SILVA NETO, G. F. S.; FONSECA, A.; BRAGA, J.W. B. Classificação De Águas Minerais Baseada Em Imagens Digitais Obtidas Por Smartphones. **Química Nova**, v. 39, n. 7, p. 876–881, 2016.
- SOARES, F. C.; RUSSI, A. D. R. J. L.; PEITER, M. X.; PARIZI, A. R. C. Uso de rede neural artificial para predição da produção na cultura do feijoeiro. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA - CONBEA, 42., 2014, Campo Grande. **Anais...** Campo Grande: Associação Brasileira de Engenharia Agrícola, 2014. p. 7.
- SOLDAT, D. J.; BARAK, P.; LEPORE, B. J. Microscale Colorimetric Analysis Using a Desktop Scanner and Automated Digital Image Analysis. **Journal of Chemical Education**, v. 86, n. 5, p. 617, 2009. doi: 10.1021/ed086p617.
- SOUSA, X. D. R. **Resposta do Milho a Diferentes Formas de Gestão da Fertilidade do Solo**. 59f. 2017. Dissertação (Mestrado em Agricultura Tropical). Instituto Politécnico de Bragança – Escola Superior Agrária, 2017. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10198/14433>. Acesso em 27 dez 2021.
- SOUZA, D. M.; NASCIMENTO, V. R.; KLEIN, V.; SANTOS, C. V.; BOSS, R. Uso do aplicativo PhotoMetrix® para determinação de fosfato em fertilizantes: um recurso didático para o ensino de química analítica. **Anais...** 24º Seminário Internacional de Educação, Tecnologia e Sociedade: Ensino híbrido. 2019.
- STRICKLAND, J. D. H.; PARSONS, T. R. **A manual of sea water analysis, with special reference to the more common micronutrientes and to particulate organic material**. Fisheries Research Board of Canada, Bull n.125, second edition, 1965, 203.
- TANAKA, R. T.; MASCARENHAS, H. A. A. **Soja, nutrição, correção do solo e adubação**. Campinas: Fundação Cargill, 1992. 60 p.
- TANDZI, N. L.; MUTENGWA, S. C. **Factors affecting yield of crops**. IntechOpen, 2020.
- VENKATESH, E. T.; THANGARAJ, P. Self-organizing map and multi-layer perceptron neural network based data mining to envisage agriculture cultivation. **Journal of Computer Science**, v. 4, n. 6, p. 494-502, 2008.

VENTIMIGLIA, L. A. et al. Potencial de rendimento da soja em razão da disponibilidade de fósforo no solo e dos espaçamentos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 34, n. 02, p. 195-199, 1999.

WANG, J.; FU, B.; QIU, Y.; CHEN, L. Analysis on soil nutrient characteristics for sustainable land use in Danangou catchment of the Loess Plateau, China. **CATENA**, v. 54, n. 1-2, p. 17-29, 2003. doi: 10.1016/S0341-8162(03)00054-7.

WONGWILAI, W.; LAPANANTNOPPAKHUN, S.; GRUDPAN, S.; GRUDPAN, K. Webcam camera as a detector for a simple labonchip time based approach. **Talanta**, v. 81, n. 3, p. 11371141, 2010. doi: 10.1016/j.talanta.2010.01.058.

YANG, C. X.; SUN, X. Y.; BIN, L.; LIAN, H. T. Determination of total phosphorus in water sample by digital imaging colorimetry. **Chinese Journal of Analytical Chemistry**, v. 35, n. 6, p. 850853, 2007. doi: 10.1016/S1872-2040(07)60059-0.

ZAMORA, L. L.; LOPEZ, P. A.; FOS, G. M. A.; ALGARRA, R. M.; ROMERO, A. M. M.; CALATAYUD, J. M. Quantitative colorimetric imaging analysis of nickel in iron meteorites. **Talanta**, v. 83, n. 5, p. 15751579, 2011. doi: 10.1016/j.talanta.2010.11.058.