

ESTIMATIVA DO ÍNDICE RELATIVO DE CLOROFILA EM FOLHAS DO CAFEIEIRO POR MEIO DE IMAGENS DIGITAIS E FERRAMENTAS QUIMIOMÉTRICAS

Mikaela M. de Bem^{*1}(PG) e Cleiton A. Nunes² (PQ)

¹UFLA, Departamento de Química, Lavras, MG, Brasil, 37200-900

²UFLA, Departamento de Ciência dos Alimentos, Lavras, MG, Brasil, 37200-900

*e-mail: mikaela.bem1@estudante.ufla.br; cleiton.nunes@ufla.br

RESUMO

Este estudo avaliou o uso de imagens digitais obtidas por smartphones para prever o índice relativo de clorofila (IRC) em folhas de café (*Coffea arabica* L.) considerando a influência da iluminação ambiente. O IRC de 160 folhas foi medido por clorofilômetro (FALKER-ClorofiLOG) e as imagens foram obtidas por meio das câmeras de três smartphones, posicionados em contato direto com as folhas. A iluminação ambiente (LUX) foi medida a cada 30 minutos pelo aplicativo Lux Meter. A partir das imagens, foram extraídos descritores para modelos de predição por regressão por mínimos quadrados parciais (PLS) usando o MATLAB, com validação em 25% dos dados (Kennard-Stone). A qualidade dos modelos foi avaliada por RMSE, R^2 e r^2_m . A seleção exaustiva de variáveis resultou em um modelo com RMSE = 11,2, $R^2 = 0,77$ e $r^2_m = 0,64$ para o grupo teste. Concluiu-se que o uso do descritor LUX melhorou a predição. Estudos futuros devem ampliar o número de amostras e testar outros métodos de calibração.

Palavras-chave: Imagens Digitais, Folhas de plantas, Clorofila, Clorofilômetro, Quimiometria.

Introdução

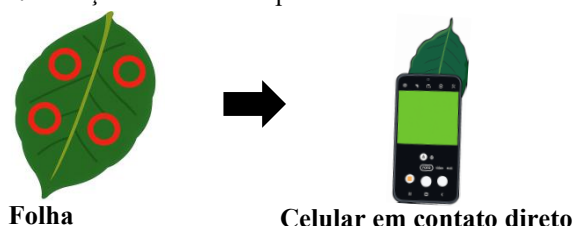
O café é uma das bebidas mais consumidas no mundo e representa uma cultura de grande relevância econômica, especialmente para o Brasil (1). A modernização da agricultura, com destaque para a agricultura de precisão, tem permitido o monitoramento em tempo real de parâmetros como o solo, o crescimento vegetal e as deficiências nutricionais, otimizando a produção (2). Na cafeicultura, a concentração foliar de nitrogênio (N) é utilizada para definir a adubação de cobertura, sendo o índice relativo de clorofila (IRC), medido por clorofilômetros, um importante indicador. Porém, o alto custo desses equipamentos pode representar um desafio para pequenos produtores. Como alternativa, parâmetros de cor, como os valores RGB obtidos por imagens digitais, apresentam correlação com o IRC e podem ser utilizados para sua estimativa (3,4). No entanto, fatores como iluminação e sombras nas folhas podem comprometer a acurácia dessas medições (5). Vesali et al. (2015) reconheceram a influência da iluminação e propuseram formas de correção, incluindo parâmetros derivados da própria câmera, a exemplo do *luminance factor* (LF). No presente estudo, o LF também foi considerado, mas não permaneceu no modelo após a seleção de variáveis. Este estudo busca integrar um parâmetro de iluminação para aprimorar a predição do índice relativo de clorofila em folhas de café por meio de imagens digitais e regressão por mínimos quadrados parciais (PLS), com o objetivo de minimizar os efeitos das variações ambientais na acurácia do modelo.

Experimental

Amostragem

Foram coletados dados de 160 folhas de cafeteiros (*Coffea arabica* L.) experimentais localizados no Campus da Universidade Federal de Lavras (UFLA). Para cada folha, os índices relativos de clorofila (IRCs) foram medidos usando um clorofilômetro (modelo FALKER - ClorofiLOG CLF2060), permitindo identificar variações nos níveis de clorose em folhas de diferentes partes da planta (Figura 1). Após a medição dos IRCs, as mesmas folhas também tiveram suas imagens obtidas por meio da câmera de três smartphones (iPhone, Motorola e Xiaomi), permitindo obter um modelo mais robusto e compatível com diferentes marcas e modelos de smartphone. As imagens foram capturadas com a câmera em contato direto com as amostras, utilizando o flash, ao longo de 20 dias. A iluminação ambiente (LUX) foi registrada a cada 30 minutos pelo aplicativo Lux Meter, nos períodos da manhã (9h às 12h) e da tarde (13h às 16h), com o objetivo de monitorar as variações de luz durante toda a coleta.

Figura 1. Medição do IRC em 4 partes da folha.



Fonte: Da autora (2025).



Processamento de imagens

As imagens obtidas pelo contato direto com a folha foram processadas diretamente no software MATLAB versão R2024b, onde foram extraídos 37 descritores para os modelos, tais como vermelho (R), verde (G) do histograma RGB, preto (K) do modelo CMYK, diferença entre o componente verde e o componente vermelho (GMR), razão do azul escuro (BDR), índice de vegetação (VI), índice de cor verde escura (DGCI), índice verde normalizado (NGI), tempo de exposição (ET), sensibilidade do sensor (ISO), entre outros.

Construção dos modelos preditivos

Para a predição dos IRCs, os modelos foram desenvolvidos utilizando regressão por mínimos quadrados parciais (PLS). Nesta etapa, aplicou-se uma seleção exaustiva de variáveis por meio de um algoritmo de autoria própria, implementado em MATLAB, o qual avaliou todas as combinações possíveis entre os descritores, visando selecionar o conjunto de variáveis que resultasse no menor erro preditivo. A partir disso, a capacidade preditiva foi avaliada por meio de parâmetros de desempenho analítico, incluindo o coeficiente de determinação (R^2), o R^2 ajustado (r^2m) e o erro quadrático médio (RMSE). A validação foi realizada com 25% dos dados reservados para teste, selecionados pelo método Kennard-Stone.

Resultados e Discussão

Os descritores que produziram um modelo com melhor capacidade preditiva foram: R, G, K, GMR, BDR, VI, DGCI, NGI, ET e ISO. A tabela 1 apresenta a comparação entre os modelos com e sem a inclusão da luz ambiente (LUX) como variável descritora, incluindo os parâmetros de desempenho analítico RMSE, R^2 e r^2m obtidos tanto na calibração quanto no teste.

Tabela 1. Parâmetros de desempenho do modelo PLS para a predição do IRC em folhas de cafeeiro usando três smartphones.

	Descritores selecionados		Descritores selecionados + LUX
calibração	RMSE	15,18	15,55
	R^2	0,70	0,70
y-randomization	RMSE	27,30	28,30
	R^2	0,03	0,02
	cR^2p	0,68	0,69
	RMSE	13,0	11,2
Teste	R^2	0,73	0,77
	r^2m	0,37	0,64

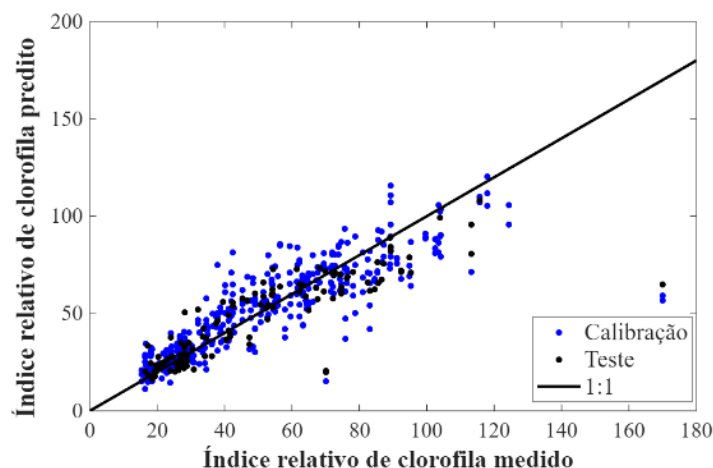
*R, G, K, GMR, BDR, VI, DGCI, NGI, ET, ISO.

Como pode-se observar na tabela 1, a inclusão do descritor lux não promoveu mudanças relevantes nos parâmetros de calibração, mas resultou em melhoria nos resultados de validação externa (teste),

(teste), que são mais adequados para avaliar o poder preditivo do modelo. Especificamente, houve redução do RMSE de 13,0 para 11,2 e aumento do R^2 de 0,73 para 0,77. Além disso, houve elevação do r^2m de 0,37 para 0,64, valor acima de 0,5, conforme recomendado. Dessa forma, fica evidente que a utilização do descritor lux, teve efeito como um compensador para variações de iluminação, contribuindo para tornar o modelo mais robusto e com melhor desempenho preditivo.

A correlação entre os valores de clorofila medidos e os valores preditos para o melhor modelo obtido neste estudo é apresentada na figura 2.

Figura 2. IRCs medidos e preditos de folhas de cafeeiro, usando três smartphones e modelo PLS com seleção de descritores + LUX.



Conclusões

Concluiu-se que o descritor LUX melhorou consideravelmente a qualidade do modelo pelo grupo teste. O modelo baseado nas variáveis selecionadas teve uma boa capacidade de generalização, uma vez que apresentou acurácia aceitável mesmo com a utilização de diferentes smartphones para obtenção das imagens. Futuros estudos deverão utilizar um número maior de amostras e outros métodos de calibração, visando obter um modelo de qualidade ainda superior.

Agradecimentos

UFLA, CNPq, CAPES, FAPEMIG, FAPESP, DQI e DCA.

Referências

1. X. Liu *et al.*, Int. J. Remote Sens. 2024, 45, 1–28.
2. U. Ahmad *et al.*, Agronomy. 2022, 12, 555.
3. C. Borges *et al.*, J. Plant Physiol. 2022, 272, 153686.
4. F. Vesali *et al.*, Photosynthetica. 2017, 55, 603-610.
5. F. Vesali *et al.*, Comput. Electron. Agric. 2015, 116, 211-220.