

## FENOTIPAGEM DE PLANTAS POR MEIO DE FERRAMENTAS DIGITAIS

Eduardo Vicente do Prado<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Centro Universitário Amparense – UNIFIA, Amparo – SP. Brasil.

### Resumo:

A queda na produtividade das culturas agrícolas em um cenário de escassez de recursos naturais e mudanças climáticas globais é um problema que afeta o agronegócio e a segurança alimentar mundial. É crucial o desenvolvimento de cultivares que maximizem o uso dos recursos naturais e sejam tolerantes aos principais estresses abióticos. Os métodos tradicionais de fenotipagem estão sendo complementados ou substituídos por procedimentos mais precisos e dinâmicos, chamados de fenotipagem digital. O objetivo deste trabalho foi trazer uma revisão bibliográfica das principais técnicas digitais utilizadas na fenotipagem atualmente, não abrangendo a totalidade da vasta literatura sobre o assunto, mas uma contribuição das principais técnicas digitais utilizadas.

**Palavras-chave:** Bióticos, Abióticos, Agricultura Digital, Agricultura de Precisão, Agricultura.

### Abstract:

The drop in the productivity of agricultural crops in a scenario of scarcity of natural resources and global climate change is a problem that affects agribusiness and world food security. It is crucial to develop cultivars that maximize the use of natural resources and are tolerant to the main abiotic stresses. Traditional phenotyping methods are being complemented or replaced by more accurate and dynamic procedures called digital phenotyping. The objective of this work was to bring a bibliographic review of the main digital techniques currently used in phenotyping, not covering the entirety of the vast literature on the subject, but a contribution of the main digital techniques used.

**Keywords:** Biotic, Abiotic, Digital Agriculture, Precision Agriculture, Agriculture.

## 1. INTRODUÇÃO

Nos últimos séculos, a agricultura tem se reinventado para atender à crescente demanda mundial de alimentos (BORÉM, 2020). A produção mundial de alimentos é afetada por fatores bióticos e abióticos. Dentre os fatores bióticos: ataque de pragas e doenças que causam alterações nos processos fisiológicos das plantas; insetos, fungos, bactérias, vírus e nematoides. Os fatores mais ligados à redução da produtividade da cultura são os fatores abióticos relacionados ao clima (secas, temperatura do ar, precipitação, umidade relativa do ar, solo, etc.). Estresses bióticos nas colheitas podem surgir de daninhas, insetos ou doenças. Estes causam graves danos econômicos às lavouras quando os limites para a incidência são excedidos.

A redução na produtividade das principais culturas agrícolas em um cenário de escassez de recursos naturais e mudanças climáticas globais é um problema que afeta o agronegócio e a segurança alimentar mundial, no curto e médio prazo. É crucial o desenvolvimento de cultivares que maximizem o

uso dos recursos naturais e sejam tolerantes aos principais estresses abióticos, como extremos de temperatura, de intensidade luminosa e de disponibilidade de água no solo. As características que os pesquisadores buscam na diversidade genética ou inserido biotecnologicamente nas plantas demandam novas técnicas de avaliação. Os métodos tradicionais de fenotipagem estão sendo complementados ou substituídos por procedimentos mais precisos e dinâmicos. Fenotipagem tem como base o tripé formado pelo genótipo, o ambiente e o fenótipo. O genótipo é a constituição genética de uma célula, de um organismo, ou de um indivíduo, podendo se referir a apenas uma característica específica em estudo. O fenótipo é o conjunto de características do indivíduo, como estrutura, forma, composição, tamanho e cor, distinguíveis por inspeção direta ou somente por métodos refinados de análise. A fenotipagem é o ato de determinar os valores qualitativos ou quantitativos das características em estudo e relacioná-las ao desempenho de um genótipo em determinado ambiente (DHONDT et al., 2013). A moderna disciplina aplicada à fenotipagem em larga escala, conhecida como fenômica. Pela analogia com o termo genoma, o fenoma se refere ao conjunto de todos os fenótipos possíveis de um determinado genótipo. Na prática, a fenômica tem como propósito o estudo do crescimento, do desempenho e da composição dos genótipos. As técnicas tradicionais de fenotipagem usam características facilmente mensuráveis, como medidas relacionadas ao peso e ao tamanho das plantas, que podem ser realizadas em qualquer horário, sem protocolo, preparação prévia da amostra ou conhecimentos para a obtenção e interpretação dos dados. São as mais usadas na experimentação a campo, embora envolvam métodos destrutivos e sejam altamente demandadoras de tempo, recursos financeiros e mão-de-obra. Os pesquisadores têm buscado agregar modernas técnicas de fenotipagem ao processo de desenvolvimento de novas cultivares. Têm-se utilizado cada vez mais de métodos modernos de análise de plantas, uma abordagem denominada fenotipagem de plantas em larga escala e de alta precisão, que pode ser realizada tanto em condições controladas quanto no campo. É em condições controladas que esse conjunto de técnicas oferece o progresso inicial mais rápido na exploração de novas características que possibilitam a identificação de genótipos mais tolerantes. Ao longo da última década, os termos fenotipagem de plantas e fenômica têm sido associados a análises ópticas não destrutivas de características vegetais, principalmente com o uso de imagens. Têm sido desenvolvidos *hardwares* e *softwares*, que possibilitam a avaliação em larga escala de diversos parâmetros ao nível das moléculas, das organelas, das células e do indivíduo como um todo. Como a amostra não é destruída no processo de medição, as características de interesse podem ser monitoradas ao longo do tempo. Devido à rapidez e a facilidade com que as imagens são capturadas, a fenômica de plantas permite a geração de grande quantidade de dados em um espaço de tempo menor do que métodos convencionais.

Em uma iniciativa para congregar as experiências em fenotipagem de plantas, em plataformas financiadas com recursos governamentais, foi criada recentemente a Rede Internacional de Fenotipagem de Plantas (IPPN). As técnicas utilizadas em fenômica de plantas abrangem diversas áreas da ciência, incluindo a espectroscopia, com a geração de imagens espectroscópicas captadas na região da radiação do visível VIS (400-700nm), do infravermelho próximo IVP (800-2500nm) e do infravermelho longo IVL (8-15µm) do espectro eletromagnético. As estruturas fixas ou móveis, desenvolvidas com base em sensores de imagem têm sido denominadas genericamente de plataformas de fenotipagem. Essa denominação faz alusão aos satélites, denominados plataformas, nos quais se embarcam sensores que geram imagens utilizadas no monitoramento de variáveis terrestres. A utilização dessas ferramentas digitais, na fenotipagem de plantas, permite avaliar o impacto dos diferentes tipos de estresses sobre as plantas, sem a necessidade de destruí-las. Ferramentas digitais são os recursos digitais que possibilitam a utilização de tecnologias com o objetivo de facilitar a comunicação e o acesso à informação, através de dispositivos eletrônicos, como computadores. As ferramentas digitais incorporaram os avanços recentes na área de computação, robótica, sistemas para captura, processamento e análise de imagens, ampliando o campo da biologia vegetal, pelo trabalho multidisciplinar de equipes. As ferramentas digitais de fenotipagem de plantas desenvolvidas atualmente dispõem basicamente de cinco tipos diferentes de sensores para a captura de imagens em diferentes regiões do espectro eletromagnético. São eles: sensores digitais para captura de imagens RGB, sensores no visível para a captura de imagens de pigmentos, sensores no infravermelho próximo para a captura de imagens relacionadas aos índices de água, sensores no infravermelho longo para a captura de imagens térmicas e sensores para a captura de fluorescência, especialmente de clorofilas (NETTO, 2020).

Modernas plataformas de fenotipagem possui uma aplicação desafiadora à visão computacional e análise de imagens, pois depende de avanços na área de computação, robótica, sistemas para captura, processamento e análise de imagens, tais como, modelagem tridimensional (3D), segmentação e classificação, metrologia por imagem, processamento de nuvens de pontos.

Este trabalho teve por objetivo fazer uma revisão bibliográfica das principais técnicas digitais utilizadas atualmente na fenotipagem de plantas, principalmente as técnicas utilizadas em larga escala.

## **2. PROPRIEDADES MENSURÁVEIS, PRECISÃO E PRATICIDADE**

No VIS a clorofila é o pigmento dominante com forte absorção nas regiões espectrais azul e vermelha que leva à cor verde das folhas. Carotenoides (pigmentos amarelos) e antocianinas (pigmentos vermelhos) dominam nas folhas senescentes. A região NIR tem características de absorção de água

fracas em torno de 975 e 1200 nm, enquanto características de absorção de água forte ocorrem em torno de 1450, 1930 e 2600 nm. Nos últimos anos, a fluorescência da clorofila (FC) induzida pelo Sol tem sido o foco de muitos estudos. Medições proximais de FC podem informar sobre a atividade fotossintética e o estresse da planta pode ser detectado. A espectroscopia sem imagem pode ser usada para medir a refletância e a transmitância das folhas, que pode ser usada para derivar características da folha, como N, clorofila ou conteúdo de água. A vantagem das medições das folhas sobre as medições do dossel é um sinal puro da folha que é medido, enquanto no dossel consistem em um sinal misto de folhas, solo, sombra e caules, frutos e outros objetos no campo de visão e são afetados por efeitos bidirecionais e ângulos de inclinação da folha. Derivar características do sinal puro da folha é mais fácil e mais confiável do que do sinal misto do dossel. A medição por espectroscopia de laboratório de amostras de folhas frescas ou secas pode ser usada para determinar os constituintes das folhas com precisão comparável às análises químicas de laboratório. A espectroscopia NIR e VIS-NIR mostrou potencial para mapear o estresse hídrico e o estado nutricional. A espectroscopia de imagem da folha é uma ferramenta de detecção proximal nova realizada em laboratório. Com um scanner hiperespectral ou quando as folhas são gravadas com câmera *full-frame*, mapas detalhados de variações de características da folha podem ser produzidos. Os dados de refletância sem imagem de dosséis podem ser adquiridos com um espectrômetro portátil se o dossel for baixo, mas para aplicações agrícolas, espectrômetros fixados em plataforma ou veículo são preferidos. Uma vantagem das medições de refletância do dossel em comparação com as medições de folhas é que elas podem ser automatizadas facilmente e áreas maiores podem ser cobertas em um tempo mais curto, pois não é necessário fixar folhas individuais para cada medição. Os dados do dossel podem ser usados para extrair características estruturais da planta, como o índice de área foliar (IAF) que também carregam informações sobre o estresse (MUAZEN, 2020).

### **3. FERRAMENTAS DIGITAIS PARA GERAÇÃO DE IMAGENS RGB.**

As imagens digitais coloridas no padrão RGB têm sido usadas para avaliar de forma dinâmica o crescimento de raízes e da parte aérea das plantas. As reproduções visuais geradas, depois de processadas, permitem a estimativa da altura, da largura, do número de folhas, do ângulo de inserção das folhas, da área foliar individual e da área projetada da parte aérea das plantas. Com base nas variáveis anteriores, é possível, a estimativa da massa da parte aérea das plantas e a determinação do acúmulo de biomassa para cada estágio de crescimento em centenas de plantas simultaneamente, algo que não é possível usando o tradicional método destrutivo. Essas imagens são obtidas nas mesmas plantas a

intervalos de tempo regulares no decorrer do período de cultivo, elas podem ser usadas para avaliar a taxa de crescimento expressa em área, massa ou altura, o que permite a obtenção de vários parâmetros fenotípicos relacionados ao crescimento, à produção (partição de assimilados) e à tolerância aos estresses (relação parte aérea/raiz, por exemplo). Considerando que a taxa de crescimento é uma característica fenotípica ligada ao genótipo, facilmente mensurável, transmissível e altamente sensível às condições ambientais, tal abordagem tem sido utilizada em larga escala para a caracterização de genótipos tanto para plantas modelo como para plantas cultivadas. O estudo do sistema radicular é uma das tarefas mais complexas visto que o órgão é subterrâneo e adere firmemente ao seu substrato. As técnicas tradicionais de escavação destroem a topologia radicular. Em anos recentes, foram desenvolvidos estudos para avaliação não destrutiva do sistema radicular por meio de imagens com o uso de diferentes técnicas. Nas plataformas de fenotipagem de plantas adquiridas “prontas para uso” de algumas companhias, o *software* para a captura e processamento das imagens é protegido por patente, o que restringe a sua utilização e inviabiliza qualquer alteração por parte do usuário. Existem *softwares* livres para a obtenção de dados similares que podem ser modificados e utilizados sem restrições, em sistemas automatizados ou manuais.

#### **4. FERRAMENTAS DIGITAIS PARA GERAÇÃO DE IMAGENS POR FLUORESCÊNCIA**

Teoricamente, é possível a geração da imagem de fluorescência emitida por qualquer molécula que absorva luz, em qualquer região do espectro eletromagnético, com a utilização de equipamento adequado. Isso possibilita a detecção precoce da infecção causada pelo vírus do mosaico a plantas de tabaco, antes do aparecimento de sintomas visuais (CHAERLE et al., 2007). A premissa básica de se medir a fluorescência da clorofila, ao invés de outros pigmentos como forma de avaliar as plantas, é que todos os tipos de estresse interferem no processo fotossintético, no qual as clorofilas desempenham papel fundamental. E qualquer interferência na fotossíntese, afeta o metabolismo da planta. Usando imagens de fluorescência da clorofila, é possível avaliar precocemente o impacto de estresses ambientais sobre as plantas, antes do aparecimento de sintomas visuais. A maioria dos trabalhos determinam a fluorescência emitida pelas clorofilas. A técnica de fluorescência da clorofila (método do pulso de saturação) permite determinar o destino da energia luminosa absorvida pelas plantas entre as três vias possíveis: fluorescência, fotoquímica e geração de calor além de possibilitar o cálculo de diversos parâmetros que podem ser usados para avaliar características específicas, como o funcionamento da antena utilizada para a captura da energia luminosa, o centro de reação do fotossistema II, a fixação de carbono e o rendimento quântico do transporte de elétrons no fotossistema II. Técnica que tem sido

utilizada para avaliação das plantas sob os mais diferentes estresses abióticos, desde a escassez ao excesso de água, extremos de temperatura e intensidade de radiação luminosa, escassez ou excesso de nutrientes ao efeito de herbicidas e bióticos, incluindo infecções causadas por fungos e vírus. Outros exemplos de aplicação da técnica de fluorescência da clorofila incluem a transição espaço-temporal da condição de uma folha-dreno para fonte de assimilados, a avaliação pós-colheita de frutos, hortaliças e flores, a medição da concentração de clorofila e da área foliar em plantas. Os modernos equipamentos fabricados especificamente para captar imagens de fluorescência da clorofila pelo método do pulso de saturação, denominados genericamente de fluorômetros, conseguem mapear uma área de aproximadamente 10x13cm, o que limita a utilização para a avaliação de uma planta inteira, se a área foliar da planta for superior ao limite do equipamento. Outras limitações da técnica para a utilização em larga escala para plantas cultivadas é o fato de medir uma planta por vez e as medições devem ser realizadas em folhas na posição horizontal. Para comparação, todas as medidas devem ser realizadas com as folhas mantidas a uma mesma distância do detector. Por causa dessas limitações e pelo fato de que os principais parâmetros de fluorescência da clorofila são obtidos em plantas aclimatadas ao escuro por, pelo menos 15 minutos, o termo avaliação em larga escala usado nas plataformas automatizadas pode ser apenas retórico. Em anos recentes, a técnica de fluorescência da clorofila tem evoluído para o uso em condições de campo, induzida pelo Sol. Essa abordagem possibilita o uso da técnica de fluorescência da clorofila em larga escala. No entanto, dificulta a sua interpretação e restringe a análise dos principais processos competitivos que utilizam a luz, especificamente a fotoquímica e a geração de calor.

## **5. FERRAMENTAS DIGITAIS PARA GERAÇÃO DE IMAGENS NA FAIXA DO VISÍVEL**

Na faixa espectral visível (400-700nm), há vários modelos de câmeras multi e hiperespectrais no mercado e utilizadas para a captura de imagens da parte aérea das plantas em plataformas de fenotipagem. O uso dessa tecnologia é porque todas as moléculas de pigmentos que absorvem radiação no VIS do espectro são passíveis de ter os seus teores estimados pelo método não destrutivo de sensoriamento remoto. Apesar de ser uma fração dos metabólitos em uma folha, os pigmentos têm importância na captura da luz na faixa VIS. As moléculas alvo principal são os pigmentos que estão nos cloroplastos e ligados à fotossíntese: as clorofilas e os carotenoides (carotenos e xantofilas), ou à proteção do aparato fotoquímico, como as antocianinas, localizadas no vacúolo. Os teores de clorofilas são utilizados para avaliar o *status* de nutrientes nas plantas e, juntamente com os carotenoides, para monitorar a fenologia foliar e avaliar os efeitos provocados por diferentes tipos de estresses, enquanto as

xantofilas servem para avaliar a eficiência fotossintética. As antocianinas que se acumulam em folhas em resposta aos mais variados tipos de estresses, previnem a fotoinibição do aparato fotoquímico através da absorção do excesso de radiação. Os teores de clorofila, associados ao caráter sempre verde e ao atraso na senescência foliar são correlacionados a um estado hídrico mais favorável e ao rendimento das culturas. Tomando-se por base a reflectância na região do espectro eletromagnético em que os pigmentos absorvem mais fortemente a radiação, foram desenvolvidos índices para monitorar a biomassa, a fenologia, as condições fisiológicas e a deficiência de nutrientes, especialmente nitrogênio. O mais conhecido e utilizado deles é o índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI):  $NDVI = (NIR - R) / (NIR + R)$ . Os valores dessa relação podem variar de -1 a +1. Quanto maior essa relação, maior a presença de clorofila e maior a atividade fotossintética. A proporção entre carotenoides e clorofila *a* pode ser estimada pelo SIPI (*structure-independent pigment index*):  $SIPI = (R800-R445) / (R800-R680)$ . Usado tanto para monitoramento da fenologia foliar quanto para a avaliação de folhas submetidas a estresses abióticos. Outro parâmetro derivado dos teores de pigmentos componentes da antena que capta a radiação luminosa é o índice de reflectância fotoquímica PRI:  $PRI = (R531-R570) / (R531+R570)$ . A variação na reflectância a 531nm deve-se ao ciclo das xantofilas, enquanto a reflectância a 570nm é usada para corrigir possíveis distorções no espalhamento da luz provocada pela estrutura foliar. O PRI pode ser explorado como um indicador da eficiência do uso da radiação fotossintética em plantas cultivadas no Sol, pois se correlaciona com a absorção líquida de CO<sub>2</sub>.

## 6. FERRAMENTAS DIGITAIS PARA A GERAÇÃO DE IMAGENS TERMOGRÁFICAS

Sistemas que geram imagens térmicas na região infravermelha (IV) do espectro eletromagnético operam nas faixas de comprimento de onda de 3-5 µm ou 7-13 µm. Ambas apresentam vantagens e desvantagens. Na primeira, as imagens são melhores, mas as câmeras funcionam apenas com o *software* aberto e, devido à proximidade com o VIS, há maior interferência da radiação refletida. Na segunda, a intensidade da radiação é maior, a interferência da radiação refletida é menor e as câmeras podem funcionar com o *software* aberto ou fechado, o que as torna portáteis e mais práticas. Em ambas as faixas, a radiação emitida pelo objeto em análise é capturada e transformada em temperatura, a partir da equação de Stefan-Boltzmann. Hoje, na maioria dos experimentos que avaliam plantas, são utilizadas as câmeras térmicas que captam a radiação emitida entre 8-14µm. Como a imagem térmica representa a radiação térmica emitida pelo objeto, a qual é superposta pela radiação térmica refletida por fontes próximas, a captura de imagens térmicas em experimentos no campo se constituía em um problema. Hoje, devido aos recentes avanços obtidos no desenvolvimento de *softwares* para a captura, geração e

processamento de imagens, a utilização de câmeras termográficas pode ser considerada uma alternativa viável para a medição em larga escala da temperatura da copa em experimentos em laboratório e no campo com eficiência similar, desde que se adotem os devidos cuidados durante a medição. Alguns cuidados que devem ser observados: (a) separação das folhas da planta de interesse de interferentes que aparecem na imagem (como o caule, solo e céu aberto); (b) variação espacial da temperatura ao longo da copa resultante da variação na condutância estomática individual das folhas e na radiação absorvida, dependendo da folha, da orientação solar e do sombreamento; (c) a variação temporal da temperatura resultante da mudança na intensidade de luz que atinge a folha (sombreamento temporário por nuvens, por exemplo) e da rápida variação na velocidade do vento e da condutância da camada limítrofe. As imagens térmicas têm sido usadas com frequência na pesquisa científica como sensores para o monitoramento do estado hídrico de plantas em sistemas automatizados de irrigação e para a seleção de plantas tolerantes ao estresse salino e ao déficit hídrico. Pode ser usada, associada a outras técnicas, para auxiliar na detecção precoce de infecções causadas por microrganismos em plantas. O uso da diferença de temperatura da copa das plantas como forma de avaliação dos estresses pressupõe que o sistema disponha de um padrão de temperatura da copa de uma planta não estressada. Todas essas aplicações têm como princípio os mecanismos de abertura e fechamento estomáticos, a primeira linha de defesa das plantas contra a perda de água, que regulam a temperatura foliar. As imagens termográficas das folhas se correlacionam ao estado hídrico da planta, ao grau de abertura estomática e à taxa de transpiração. As imagens termográficas podem auxiliar na definição dos genótipos mais tolerantes e dos mais susceptíveis aos diferentes tipos de estresses em programas de melhoramento vegetal. Câmeras podem ser usadas para a discriminação de genótipos de plantas com base nas diferenças de temperatura da copa, desde que o detector tenha capacidade de gerar imagens em tempo real a uma taxa de frequência de 60Hz.

## **7. FERRAMENTAS DIGITAIS PARA A GERAÇÃO DE IMAGENS NA REGIÃO INFRAVERMELHA DO ESPECTRO.**

A região de radiação IV do espectro eletromagnético compreende uma faixa localizada entre o VIS e micro-ondas, com comprimentos de onda que variam de 0,7-100 $\mu$ m. Essa região do espectro tem sido utilizada para a geração de imagens que correspondem à faixa de absorção de moléculas importantes, com potencial para aplicação em várias áreas do conhecimento. Hoje, há equipamento capaz de gerar imagens do conteúdo de água presentes em folhas. As imagens obtidas permitem visualizar a distribuição espacial do conteúdo de água ao longo da lâmina foliar em uma folha fresca e,



nesta mesma folha, 48h após ser destacada da planta. O desenvolvimento de equipamentos é limitado pelo alto custo e dificuldade em se obter uma fonte de luz adequada. A faixa do IVP (0,7-3,0 $\mu$ m) é útil para a análise não invasiva *in situ* de metabólitos primários associados diretamente com o crescimento vegetal por três razões: (i) porque esse tipo de radiação não é absorvido pelos pigmentos foliares; (ii) a grande maioria dos metabólitos presentes nas folhas absorve a radiação IV em faixas específicas; (iii) a radiação IV penetra a maiores profundidades no tecido vegetal, em comparação à luz visível. Esta última, talvez, seja a razão pela qual essa faixa da radiação eletromagnética tem grande aplicação na avaliação de lesões internas em frutos e vegetais. Ocorre uma queda exponencial na intensidade da radiação com a profundidade do tecido e o espalhamento limita a técnica a alguns milímetros de profundidade. O desenvolvimento de tecnologias para a captura de imagens em faixas específicas do espectro IV tem impulsionado a sua utilização para a avaliação do estado metabólico e do desempenho das plantas sob as mais variadas condições. Tem sido possível a determinação do conteúdo de compostos do metabolismo celular, como os açúcares solúveis e poliméricos, compostos orgânicos nitrogenados, incluindo proteínas e aminoácidos, biomassa, lipídeos, água, vitaminas e nutrientes minerais com sensibilidade suficiente para a detecção de diferenças entre genótipos. Essa técnica para a avaliação de plantas ainda não é utilizada em larga escala nos programas de melhoramento genético de plantas. O desenvolvimento de um equipamento desses é um trabalho que envolve a escolha de fontes de iluminação, lentes, filtros, câmeras e detectores, requerendo uma equipe multidisciplinar com conhecimento suficiente para a montagem, ajuste e validação do sistema. É possível afirmar que a dificuldade de se encontrar equipamentos disponíveis no mercado, com aplicações na pesquisa com plantas, seja o principal gargalo para a popularização do uso das imagens na região IV do espectro. Tais equipamentos facilitariam a obtenção de dados valiosos nas áreas de biologia e agronomia.

## 8. OUTRAS TÉCNICAS DISPONÍVEIS

Além da possibilidade de geração de imagens, é possível utilizar o potencial hídrico de plantas pelos métodos da câmara de pressão e do psicrômetro. A fluorescência da clorofila pode ser avaliada isoladamente ou simultaneamente às trocas gasosas com equipamento apropriado. É possível discriminar e quantificar a concentração de dezenas de metabólitos, utilizando modernas técnicas de cromatografia e espectroscopia de massas.

## 9. CONCLUSÕES

Nos últimos anos, os avanços principalmente na área de espectroscopia por imagem, permitiram o surgimento de novos métodos de fenotipagem de plantas, mais rápidos e precisos que métodos tradicionais. A vantagem está na preservação da integridade da amostra, o que permite a avaliação de uma determinada característica ao longo do ciclo da cultura. As novas características avaliadas são mais específicas e complexas, mas permitem que se façam inferências mais seguras e confiáveis sobre a forma, a estrutura e o metabolismo das plantas. A automação do processo de medição das características avaliadas tem possibilitado ganho em escala e economia de tempo, recursos e mão-de-obra. A tecnologia de geração de imagens tem evoluído para a avaliação de plantas cultivadas, de maior porte e complexidade estrutural, em campo. Apesar de todos os avanços obtidos nos últimos anos, a fenotipagem em larga escala, ainda, não conseguiu atender uma das principais expectativas dos melhoristas: a validação de um protocolo mínimo, contendo um conjunto de parâmetros que possam ser medidos de forma rápida, fácil e precoce e utilizados para prever, de forma confiável, o crescimento e a produção. No contexto das mudanças climáticas globais, que prevê a intensificação das condições extremas do ambiente e escassez de recursos naturais, espera-se que a fenômica possa ser largamente empregada no futuro para a seleção de genótipos tolerantes às mais diferentes condições de estresses bióticos e abióticos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BORÉM, A. Nova revolução verde. **In:** Agricultura digital. Ed. UFV: Viçosa, MG. 2020.
- CHAERLE, L., [et al.]. Multi-color fluorescence imaging for early detection of the hypersensitive reaction to tobacco mosaic virus. **Journal of Plant Physiology**, 2007.
- DHONDT, S., WUYTS, N., INZÉ, D. Cell to whole-plant phenotyping: the best is yet to come. **Trends in Plant Science** **18**, 428-439. 2013
- MUAZEN, A. M.; [et al.]. Monitoring. **In:** Castrignano, A. [et al.]. Agricultural internet of things and decision support for precision smart farming. New York: Editora Elsevier. 2020.
- NETTO, N. Plataformas, consoles e softwares. **In:** Agricultura digital. Ed. UFV: Viçosa, MG. 2020.