

Uso de câmeras térmicas embarcadas em aeronaves remotamente pilotadas, visando à fenotipagem de plantas



**Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Embrapa Meio-Norte
Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento**

DOCUMENTOS 269

Uso de câmeras térmicas embarcadas em aeronaves remotamente pilotadas, visando à fenotipagem de plantas

Carlos Antônio Ferreira de Sousa

Aderson Soares de Andrade Júnior

Edson Alves Bastos

Raphael Augusto das Chagas Noqueli Casari

Adilson Kenji Kobayashi

Hugo Bruno Correia Molinari

Manoel Teixeira Souza Júnior

Thiago Teixeira Santos

Embrapa Meio-Norte
Teresina, PI
2020

Exemplares desta publicação podem ser adquiridos na:

Embrapa Meio-Norte

Av. Duque de Caxias, 5.650,
Bairro Buenos Aires

Caixa Postal 01

CEP 64008-480, Teresina, PI

Fone: (86) 3198-0500

Fax: (86) 3198-0530

www.embrapa.br/meio-norte

Serviço de Atendimento ao

Cidadão(SAC)

www.embrapa.br/fale-conosco/sac

Comitê Local de Publicações da Unidade Responsável

Presidente

Danielle Maria Machado Ribeiro Azevêdo

Secretário-administrativo

Jeudys Araújo de Oliveira

Membros

Edvaldo Sagrilo, Orlane da Silva Maia, Luciana Pereira dos Santos Fernandes, Lígia Maria Rolim Bandeira, Humberto Umbelino de Sousa, Pedro Rodrigues de Araújo Neto, Antônio de Pádua Soeiro Machado, Alexandre Kemenes, Ana Lúcia Horta Barreto, Braz Henrique Nunes Rodrigues, Francisco José de Seixas Santos, João Avelar Magalhães, Rosa Maria Cardoso Mota de Alcantara

Supervisão editorial

Lígia Maria Rolim Bandeira

Revisão de texto

Francisco de Assis David da Silva

Normalização bibliográfica

Orlane da Silva Maia

Editoração eletrônica

Jorimá Marques Ferreira

Foto da capa

Carlos Antônio Ferreira de Sousa

1ª edição

1ª impressão (2020): formato digital

Todos os direitos reservados.

A reprodução não autorizada desta publicação, no todo ou em parte, constitui violação dos direitos autorais (Lei no 9.610).

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Embrapa Meio-Norte

Uso de câmeras térmicas embarcadas em aeronaves remotamente pilotadas, visando à fenotipagem de plantas / Carlos Antonio Ferreira de Sousa ... [et al.]. - Teresina : Embrapa Meio-Norte, 2020.

29 p. : il. ; 16 cm x 22 cm. - (Documentos / Embrapa Meio-Norte, ISSN 0104-866X ; 269).

1. Planta. 2. Fenotipagem. 3. Termografia. 4. Sensoriamento remoto. I. Sousa, Carlos Antônio Ferreira de. II. Título. III. Série. IV. Embrapa Meio-Norte.

CDD 621.384 (21. ed.)

Orlane da Silva Maia (CRB 3/915)

© Embrapa, 2020

Autores

Carlos Antônio Ferreira de Sousa

Engenheiro-agrônomo, doutor em Biologia Vegetal, pesquisador da Embrapa Meio-Norte, Teresina, PI

Aderson Soares de Andrade Júnior

Engenheiro-agrônomo, doutor em Irrigação e Drenagem, pesquisador da Embrapa Meio-Norte, Teresina, PI

Edson Alves Bastos

Engenheiro-agrônomo, doutor em Irrigação e Drenagem, pesquisador da Embrapa Meio-Norte, Teresina, PI

Raphael Augusto das Chagas Noqueli Casari

Engenheiro ambiental, especialista em fenotipagem de plantas por sensoriamento remoto, Casari Consultoria Ltda, Brasília, DF

Adilson Kenji Kobayashi

Biólogo, doutor em Fitopatologia, pesquisador da Embrapa Agroenergia, Brasília, DF

Hugo Bruno Correia Molinari

Engenheiro-agrônomo, doutor em Biotecnologia Vegetal,
pesquisador da Embrapa Agroenergia, Brasília, DF

Manoel Teixeira de Souza Júnior

Engenheiro-agrônomo, doutor em Fitopatologia/Biologia
Molecular, pesquisador da Embrapa Agroenergia, Brasília, DF

Thiago Teixeira Santos

Cientista da Computação, doutor em Ciência da Computação,
pesquisador da Embrapa Informática, Campinas, SP

Apresentação

A termografia é uma técnica que vem se consolidando especialmente em programas de melhoramento genético e biotecnologia visando a seleção de plantas mais tolerantes à seca e à salinidade, mas, também, no manejo da irrigação em culturas. Isto porque a correlação da temperatura da copa com as variáveis de plantas, tais como as taxas de condutância estomática e transpiração, além do rendimento econômico, tem sido demonstrada em diversos trabalhos. Em um futuro próximo, a termografia fará parte de um rol de técnicas de sensoriamento remoto utilizadas rotineiramente para a fenotipagem de plantas.

Ultimamente, tem havido grandes avanços na instrumentação necessária ao sensoriamento remoto. Isto inclui o desenvolvimento de novas câmeras portáteis, mais leves e mais versáteis, além de aeronaves remotamente pilotadas as quais possuem maior capacidade de carga e autonomia de voo. Conseqüentemente, grandes avanços têm sido obtidos na captura de imagens com alta resolução espectral, espacial e temporal. Com o desenvolvimento e disponibilização dos novos softwares de processamento, a discriminação dos pixels de plantas tem se tornado mais fácil, rápida e precisa, de forma que a medida de temperatura da copa das plantas é mais confiável.

Este documento contempla os conceitos básicos e os requisitos mínimos que precisam ser observados por usuários que desejam utilizar a termografia como uma técnica de sensoriamento remoto para aplicação na avaliação de plantas. O assunto é introduzido em uma sequência lógica que começa pelos requisitos mínimos de configuração de uma moderna câmera térmica, passa pela captura e processamento das imagens, obtenção da temperatura da copa das plantas, cálculo de parâmetros derivados e termina com exemplos do uso desses parâmetros em várias aplicações, tanto na pesquisa científica quanto na lavoura, em condições de campo. Para aqueles que principiam na sua utilização, este documento pode ser considerado como um tutorial.

Luiz Fernando Carvalho Leite

Chefe-Geral da Embrapa Meio-Norte

Sumário

Introdução.....	8
Medição de temperatura por sensoriamento remoto.....	10
Configurações requeridas pela câmera térmica para a captura de imagens.....	12
Foco	12
Emissividade (ϵ) do objeto-alvo.....	13
Refletividade (ρ)	15
Transmissividade (T) da atmosfera	17
Resolução espacial da imagem térmica.....	18
Embarque de câmeras térmicas em RPAs.....	19
Horário do dia para a captura de imagens térmicas em plantas	21
Processamento de imagens térmicas para extração de temperatura do objeto-alvo	22
Índices gerados para avaliação das plantas a partir da temperatura da copa.....	23
Considerações finais	25
Referências	26

Introdução

Atualmente, a avaliação de plantas por sensoriamento remoto tem ganhado impulso devido aos rápidos avanços tecnológicos no desenvolvimento de câmeras portáteis com alta resolução espacial, espectral, temporal e radiométrica, além de aeronaves remotamente pilotadas (RPAs) capazes de embarcar tais câmeras, com autonomia de voo cada vez maior (Budiyono, 2007; Lapray et al., 2014; Sagan et al., 2019). Essa complexa instrumentação, controlada por poderosos softwares para captura e processamento das imagens, tem tornado possível o desenvolvimento de protocolos de fenotipagem de plantas para as mais diferentes situações. Entre as vantagens do uso de sensoriamento remoto para a avaliação de plantas, está a redução de custos de uma inspeção manual, além do ganho em escala, precisão e repetibilidade. As aplicações de sensoriamento remoto na agricultura têm sido voltadas para avaliar desde falhas no plantio (Oliveira et al., 2018), estimar rendimento (Qian et al., 2018; Awad, 2019) e estudar estresses bióticos, incluindo ataques de pragas (Miranda et al., 2014) e doenças (Padmavathi; Thangadurai, 2016; El Sghair et al., 2017), assim como estresses abióticos, tais como, seca (Hoffmann et al., 2016; Casari et al., 2019), salinidade (Sirault et al., 2009), frio (Enders et al., 2019) e calor (Islam et al., 2018).

Com a instrumentação disponível, o principal desafio dos cientistas de plantas agora é desenvolver, adaptar e refinar protocolos que possam ser utilizados em programas de pesquisa, bem como para a detecção precoce de problemas em lavouras, de forma que providências possam ser tomadas, antes que atinjam o nível de dano econômico. Muito já tem sido feito com o uso de câmeras térmicas especialmente para a discriminação de plantas tolerantes à seca (Reynolds et al., 1998) e salinidade (Sirault et al., 2009), bem como detecção precoce de doenças (Chaerle; Van Der Straeten, 2000; Prashar; Jones, 2014) e status hídrico de plantas (Jones et al., 2002; Hoffmann et al., 2016; Bian et al., 2019). Porém muito mais poderá ser feito ao se popularizar o uso das câmeras e, principalmente, ao se definirem protocolos seguros e confiáveis para a avaliação de plantas em todas

essas situações.

Uma câmara que captura radiação infravermelha térmica mede e reproduz em imagens a radiação emitida pelos objetos. O fato de a radiação resultar da temperatura da superfície do objeto possibilita à câmara calcular e registrar a temperatura. O uso de câmeras portáteis que geram imagens térmicas, é um requisito para a medição da temperatura em larga escala. No entanto a capacidade de detectar remotamente a temperatura, em oposição ao contato direto com a superfície, precisa levar em conta as particularidades do objeto a ser medido, além das variáveis ambientais.

A detecção da temperatura por sensoriamento remoto depende das características do objeto-alvo, da interferência atmosférica e, também, do sistema de geração de imagens. As características do objeto-alvo que mais influenciam a medição da temperatura, são a emissividade e a refletividade nos comprimentos de onda do espectro infravermelho. A atmosfera influencia na medição da temperatura, absorvendo e emitindo energia térmica com base em sua composição e na distância entre a câmera e o objeto-alvo. A capacidade de resolução espacial do sistema de geração de imagens térmicas depende do foco e da resolução do pixel. Contudo a influência de cada um desses fatores na precisão da medida é altamente dependente da aplicação específica. Para as plantas, de modo geral, como as diferenças de temperatura entre os genótipos submetidos a uma mesma condição de cultivo são muito pequenas, para conseguir discriminá-los com precisão, todos esses fatores devem ser rigorosamente levados em consideração.

Um dos desafios do uso eficaz da imagem térmica é a calibração apropriada e a correção da atmosfera/emissividade, principalmente porque a grande variedade de câmeras atualmente disponível no mercado oferece diferentes procedimentos de calibração a diferentes preços e capacidades, ou seja, sensibilidade térmica e resolução de temperatura (Sagan et al., 2019). A câmara térmica precisa ser configurada para a obtenção das imagens do objeto-alvo. A configuração pode ser realizada diretamente na câmera antes de se fazer a imagem ou posteriormente no computador, utilizando-se o

software apropriado. Ao se alterar qualquer valor das variáveis configuradas no termograma, automaticamente altera-se o valor do pixel. Isso porque a câmera térmica tem algoritmos internos cujas variáveis precisam ser alimentadas pelo usuário.

Para ajudar a configurar a câmera térmica e capturar a melhor imagem para posterior análise, há alguns parâmetros que precisam necessariamente ser estabelecidos, a depender da sua aplicação. Este trabalho tem como objetivo introduzir os conceitos básicos de termografia, bem como orientar o usuário na configuração de uma câmera térmica, captura de imagens, discriminação dos pixels do objeto-alvo, além do cálculo e da interpretação dos mais utilizados parâmetros, derivados da temperatura da copa de plantas.

Medição de temperatura por sensoriamento remoto

Este item basicamente segue a abordagem usada por Usamentiaga et al. (2014) ao decompor o algoritmo interno de medição de temperatura embutido no pacote de software de captura e processamento das imagens em câmeras térmicas modernas. A medição de temperatura usando-se infravermelho térmico capta a radiação infravermelha emitida por um objeto e converte a energia detectada em um valor de temperatura. No entanto, como nem toda a radiação recebida vem do objeto-alvo, para medir com precisão a temperatura, a radiação de outras fontes, tais como, objetos circundantes ou a atmosfera, deve ser removida na conversão para temperatura. Esse processo é chamado de compensação. A radiação total recebida pela câmera térmica (W_{tot}) vem de três fontes: a emissão do objeto alvo (E_{obj}), a emissão do ambiente circundante e refletida pelo objeto-alvo (E_{refl}) e a emissão da atmosfera (E_{atm}), conforme a equação 1:

$$W_{tot} = E_{obj} + E_{refl} + E_{atm} \quad (1)$$

A fonte principal de radiação é a emissão a partir do objeto-alvo. No entanto nem toda a radiação emitida pelo objeto-alvo atinge o sensor. Em função da transmitância da atmosfera (τ_{atm}), alguma radiação é absorvida pela atmosfera. Assim, a emissão do objeto-alvo pode ser expressa pela equação 2:

$$E_{obj} = \epsilon_{obj} \cdot T_{atm} \cdot \sigma \cdot (T_{obj})^4 \quad (2)$$

Em que:

E_{obj} = emissão de radiação pelo objeto-alvo

ϵ_{obj} = emissividade da radiação pelo objeto-alvo

T_{atm} = transmitância da radiação pela atmosfera

T_{obj} = temperatura do objeto-alvo

σ = constante

Os corpos cinza, como as folhas de plantas, têm uma refletividade (p) maior que zero. Assim eles refletem a radiação infravermelha emitida pelo ambiente. Parte dessa radiação refletida também é absorvida pela atmosfera. Esse é o segundo componente recebido pela câmera e pode ser expresso conforme a equação 3:

$$E_{refl} = p_{obj} \cdot T_{atm} \cdot \sigma \cdot (T_{refl})^4 = (1 - \epsilon_{obj}) \cdot T_{atm} \cdot \sigma \cdot (T_{refl})^4 \quad (3)$$

Em que:

E_{refl} = radiação refletida pela atmosfera

p_{obj} = refletividade do objeto-alvo

T_{atm} = transmitância da atmosfera

T_{refl} = temperatura refletida

σ = constante

O terceiro componente é a emissão (ϵ) de radiação infravermelha pela atmosfera, que pode ser expressa pela equação 4, em que $1-T_{atm}$ é a transmitância da atmosfera:

$$E_{atm} = \varepsilon_{atm} \cdot \sigma \cdot (T_{atm})^4 = (1 - T_{atm}) \cdot \sigma \cdot (T_{atm})^4 \quad (4)$$

Em que:

E_{atm} = radiação emitida pela atmosfera

ε_{atm} = emissividade da atmosfera

T_{atm} = temperatura da atmosfera

σ = constante

Substituindo-se as equações 2 a 4 na equação 1, tem-se a equação 5. Portanto a temperatura do objeto pode ser calculada a partir dessa equação. Equações semelhantes são usadas por diferentes fabricantes de câmeras para realizar medições de temperatura.

$$T_{obj} = \frac{\sqrt[4]{W_{tot} - (1 - \varepsilon_{obj}) \cdot T_{atm} \cdot \sigma \cdot (T_{refl})^4 - (1 - T_{atm}) \cdot \sigma \cdot (T_{atm})^4}}{\varepsilon_{obj} \cdot T_{atm} \cdot \sigma} \quad (5)$$

Configurações requeridas pela câmera térmica para a captura de imagens

Este item basicamente segue as recomendações da Flir para a configuração de câmeras térmicas modernas (Radiometric..., 2016).

Foco

O primeiro parâmetro a ser ajustado em uma câmera térmica é o foco. Na óptica geométrica, o foco é o ponto onde a radiação originária de um objeto converge ou, de outra forma, o ponto onde se concentra a radiação que passa por uma superfície transparente. Algumas câmeras infravermelhas são fabricadas com uma lente de foco fixo. O uso dessas câmeras requer habilidade para se encontrar o melhor ponto de distância do seu alvo, o

qual fornece a clareza de detalhes na imagem. Para câmeras térmicas com foco manual, o operador deve procurar o foco do seu alvo de forma muito paciente e travar o foco quando atingir uma imagem nítida para, finalmente, apertar o botão de captura. As câmeras infravermelhas mais sofisticadas têm um autofoco ou um botão que permite ajustar o foco automaticamente. Ambas as opções fornecem boa focalização da imagem, mas exigem diligência por parte do operador, uma vez que tais recursos não são tão consistentes quanto à percepção “olho-mão” de um foco manual. Foco é uma das chaves para o sucesso em termografia. Os termografistas experientes costumam dizer: “Ajuste o foco, o resto se arruma depois”. Isso porque o foco é um dos poucos parâmetros que não se pode alterar posteriormente em uma imagem termográfica. Portanto perca um pouco de tempo testando todas as possibilidades que a câmera lhe permite para o melhor ajuste do foco da imagem.

Para melhorar o foco e obter a imagem mais nítida, o ideal é que a câmera térmica esteja montada sobre um tripé ou sobre uma plataforma fixa, de forma que não haja possibilidade de a câmera se movimentar minimamente no momento da captura da imagem. Quando as câmeras térmicas são embarcadas em RPAs, o vento e a própria trepidação causada pelo motor da aeronave podem provocar o chamado efeito arraste, em que a imagem perde nitidez.

Emissividade (ϵ) do objeto-alvo

É a proporção de energia radiante emitida por um corpo em relação à energia radiante emitida por um corpo negro na mesma temperatura (Usamentiaga et al., 2014). A emissividade, portanto, é uma medida da eficiência de uma superfície para emitir energia térmica em relação a um corpo negro perfeito, o qual tem emissividade igual a 1. Em essência, o valor de emissividade significa a porcentagem de energia que está sendo capturada pela câmera, a qual é realmente emitida pelo objeto-alvo. A emissividade é alta-

mente dependente da morfologia da superfície, da rugosidade, da oxidação, do comprimento de onda espectral, da temperatura e do ângulo de visão. À temperatura ambiente, como referência, considera-se a emissividade das folhas de plantas no infravermelho térmico na faixa de 0,95-0,98. No entanto, dependendo do tipo de estresse, é possível que a folha altere completamente a sua morfologia e, conseqüentemente, a emissividade. Portanto é preciso ficar atento a esse detalhe ao se compararem plantas submetidas a estresses em relação às plantas-controle.

O parâmetro de calibração mais importante para medição de temperatura usando-se radiação infravermelha é a emissividade. Portanto materiais de baixa emissividade emitem menos radiação infravermelha do que materiais com alta emissividade na mesma temperatura. A medição precisa da emissividade é particularmente importante em materiais de baixa emissividade. Em objetos com alta emissividade, pequenas variações no valor real de emissividade causam apenas pequenas alterações nas temperaturas da superfície resultantes. No entanto, em objetos de baixa emissividade, como aço polido ou alumínio, a medição da temperatura é particularmente complicada, porque pequenas variações na emissividade levam a grandes variações nas temperaturas resultantes.

É possível determinar a emissividade de um objeto por um método bastante simples, conforme descrito a seguir: coloca-se o objeto-alvo (uma folha de planta, por exemplo) juntamente com uma fita isolante preta (para mimetizar um corpo negro, $\epsilon=1$) sobre uma chapa com temperatura uniforme e conhecida até que ambas entrem em equilíbrio com a temperatura da chapa. O objeto-alvo deve ser aquecido até alcançar a temperatura real de trabalho (para uma folha de planta, por exemplo, 30 °C). Nesse caso, ambas (folha e fita) terão a mesma temperatura, que é a temperatura da chapa. Configura-se previamente o valor de temperatura refletida, ajusta-se a emissividade para 1 e mede-se a temperatura da fita, utilizando-se uma das funções da câmera: isotérmica (ajuda a determinar quanto o aquecimento foi uniforme), caixa (ideal para superfícies com emissividade variável) ou ponto (medida pontual). Em seguida, por tentativa, ajusta-se

um valor de emissividade para a folha, mantendo-se os demais parâmetros uniformes, de forma que a temperatura da folha medida pela câmera torne-se igual à temperatura da fita. Quando isso acontecer, aquela será a emissividade da folha.

Durante o procedimento, evite a convecção forçada e procure uma área circundante termicamente estável, que não gere pontos de reflexão. Além disso, utilize fita de alta qualidade, não transparente e com elevada emissividade. Esse método assume que as temperaturas da fita e da superfície da amostra são exatamente iguais. Caso contrário, a medição da emissividade será incorreta.

Lembre-se de que, se o seu objetivo for apenas obter diferenças de temperaturas entre objetos iguais, ou seja, termografia qualitativa, a configuração de emissividade não é fundamental, pois o mesmo erro estaria igualmente distribuído entre os objetos.

Refletividade (ρ)

É a razão entre o fluxo de radiação refletida (Φ_r) por uma superfície e o fluxo de radiação incidente (Φ_i). Em materiais opacos, em que não há transmissão de energia, a refletividade está relacionada à emissividade (ϵ) pela equação: $R = 1 - \epsilon$. A determinação de temperatura usando-se infravermelho térmico mede a radiação infravermelha emitida por um objeto e converte a energia detectada em um valor de temperatura. No entanto, como nem toda a radiação recebida vem do objeto-alvo, para medir com precisão a temperatura, a radiação de outras fontes, tais como, objetos circundantes ou a atmosfera, deve ser removida na conversão para temperatura. Esse processo é chamado de compensação. Conforme a equação 1, a radiação total recebida pela câmera térmica (W_{tot}) vem de três fontes: a emissão do objeto-alvo (E_{obj}), a emissão do ambiente circundante e refletida pelo objeto-alvo (E_{refl}) e a emissão da atmosfera (E_{atm}) (Usamentiaga et al., 2014).

A temperatura refletida também é um parâmetro importante, especialmente quando a refletividade do objeto-alvo é alta, ou seja, em materiais com baixa emissividade. Consequentemente, torna-se desafiador realizar medições de temperatura de uma superfície reflexiva, uma vez que a imagem é altamente influenciada pelas reflexões térmicas de fundo. Por exemplo, a partir de uma câmera térmica acoplada a uma aeronave remotamente pilotada (RPA), posicionada acima de uma superfície de metal limpo e sem pintura (portanto, altamente reflexiva), tal superfície pode parecer mais fria do que realmente é porque reflete o céu acima dela. Um céu claro pode ter uma temperatura de fundo bem abaixo de $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ e, não raro, tão baixa quanto $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, embora haja variações de acordo com as condições atmosféricas e a hora do dia.

Superfícies altamente reflexivas apresentam desafios adicionais em aplicações com RPAs. O reflexo do sol aparecerá na imagem térmica como um brilho intenso e as medições radiométricas de temperatura do brilho do sol podem ser imprecisas em centenas de graus. Assim é aconselhável fazer uma sequência de imagens da superfície reflexiva de diferentes ângulos para reduzir a influência de qualquer brilho do sol. No entanto é preciso ter cuidado para não fazer medições em ângulos extremamente oblíquos, pois a refletividade diminui à medida que diminui o ângulo de visão. Por outro lado, as medições em ângulo reto com a câmera muito próxima do objeto-alvo podem resultar na captura do reflexo da própria câmera e, portanto, em medições imprecisas. Consequentemente, o ângulo mais apropriado para a medição de superfícies altamente reflexivas usando-se RPAs deve ser de 60° ou menor em relação à normal. Assim como a emissividade, a refletividade de uma superfície é altamente dependente da morfologia e da rugosidade da superfície.

Na prática, é possível compensar o efeito da refletividade em uma imagem térmica usando-se o método do papel alumínio, também conhecido como método do refletor. O papel alumínio é utilizado na termografia comumente para medir a temperatura refletida, a qual será usada como base para o cálculo da temperatura real do objeto-alvo, ou seja, a temperatura calcu-

lada a partir da radiação captada pela câmera térmica na faixa de 8 μm a 14 μm . Nesse caso, o papel alumínio precisa ser totalmente amassado e depois esticado novamente, com o lado brilhante voltado para a câmera, para mimetizar o efeito da radiação dos objetos vizinhos ao objeto-alvo, sendo refletida por todos os lados. Para isso, configura-se a emissividade da câmera para o valor 1 ($\epsilon=1$) e a distância para zero. Com essa configuração, determina-se a temperatura do papel alumínio. Em seguida, repete-se a medição da temperatura do papel alumínio, agora com a câmera configurada com o dado de temperatura refletida medido anteriormente. Segundo Usamentiaga et al. (2014), a temperatura resultante dessa segunda medição é o dado correto de temperatura refletida. Para que essa medida possa ser usada como temperatura refletida (para corrigir a captura de radiação infravermelha apenas refletida pelo objeto-alvo), a folha de alumínio deve estar na mesma posição, nas mesmas condições e na mesma distância do objeto-alvo a ser medido.

Transmissividade (T) da atmosfera

A atmosfera terrestre interfere na imagem térmica absorvendo e emitindo radiação infravermelha em função da densidade do ar, da umidade relativa do ar e da distância entre a superfície do objeto-alvo e a câmera. A transmissão atmosférica entre a câmera e o objeto-alvo pode alterar a medição radiométrica da temperatura e é uma medida do calor efetivo que atinge a câmera. Não considerar a transmissão atmosférica, resultará em medições radiométricas que parecem mais frias que a temperatura real da superfície.

A atmosfera pode afetar as medições de temperatura de outras maneiras. As medições devem sempre ser realizadas na ausência de chuva, neve, fumaça ou poeira porque também reduzem a transmissão atmosférica e alteram a temperatura de fundo. Por fim, as medições radiométricas registram apenas a temperatura da superfície, a qual pode ser muito sensível a ventos fortes.

A transmitância da atmosfera é geralmente estimada configurando-se a distância do objeto-alvo ao sensor térmico e o valor de umidade relativa do ar. Em geral, o valor de transmitância da atmosfera é muito próximo a 1. A temperatura da atmosfera é obtida usando-se um termômetro comum. No entanto, como a emissão da atmosfera é muito próxima de zero ($1-\tau_{\text{atm}}$), esse parâmetro tem pouca influência na medição da temperatura do objeto-alvo.

Resolução espacial da imagem térmica

Resolução espacial é a capacidade de um sensor em detectar ou “enxergar” objetos em uma superfície. Dessa forma, quanto melhor a resolução espacial, menor o objeto distinguível pelo sensor. A resolução espacial depende do número de pixels nas imagens. As câmeras térmicas, em geral, têm baixa resolução espacial.

A imagem térmica radiométrica de uma superfície é formada por pixels. Cada pixel fornece uma medida de temperatura. Quanto menor o número de pixels e, conseqüentemente, maior a área que cada pixel cobre na imagem, menor a resolução térmica espacial. Quanto maior o tamanho do pixel, menor a precisão da medida devido aos efeitos de distorção óptica, de difração, de luz difusa e de processamento de imagem pelo sensor, os quais resultam em uma imagem “desbotada”. Ao se desconsiderar o efeito do tamanho do pixel, quanto maior o tamanho do pixel, maior a possibilidade de que as medições possam ser influenciadas por superfícies próximas. Por exemplo, um objeto quente pode parecer mais frio e um objeto frio pode parecer mais quente do que as temperaturas reais devido aos pixels mistos, que cobrem parte do objeto-alvo e parte de um objeto circundante.

Embora o efeito do tamanho do pixel possa ser altamente dependente da câmera térmica específica, as medições de laboratório da FLIR nas câmeras embarcadas em RPAs sugerem que uma área a ser medida na imagem térmica deve ter, no mínimo, 10 pixels de diâmetro para registrar uma medição confiável, porém um diâmetro de 20 pixels é suficientemente grande para anular o efeito do tamanho do pixel.

Embarque de câmeras térmicas em RPAs

Visando ampliar o campo de visão da área a ser imageada, focar na copa das plantas e aumentar as escalas temporal e espacial na captura de imagens térmicas, têm sido usadas desde escadas (Costa et al., 2013), empilhadeiras (Prashar et al., 2013), guindastes acoplados a tratores (Zia et al., 2013) ou caminhões (Möller et al., 2007) e, mais recentemente, aeronaves pilotadas como helicópteros (Deery et al., 2016) e zeplins (Liebisch et al., 2015) e, principalmente, aeronaves remotamente pilotadas (RPAs) (Chapman et al., 2014; Casari et al., 2019; Sagan et al., 2019). O uso de RPAs tem crescido devido ao aumento da quantidade de fabricantes e modelos disponíveis, ao aumento da autonomia de voo e capacidade de carga, à redução do preço, à melhoria nos softwares de navegação e, atualmente, à regulamentação do seu uso em vários países. Além disso, tem surgido uma nova geração de sensores, menores e mais leves, ideais para serem embarcados em RPAs.

A grande vantagem das RPAs é que elas podem ser facilmente desmontadas e transportadas para avaliar experimentos em diferentes sítios e situações distintas. Existem várias marcas e modelos de câmeras térmicas desenhadas para serem embarcadas em RPAs. A principal característica delas é o tamanho e o peso reduzidos, em torno de 100 g. Entre elas, encontram-se as câmeras Flir Mod. Zenmuse XT (<https://www.dji.com/br/zenmuse-xt>), Flir Mod. Vue Pro R 640 (<https://www.flir.com/products/vue-pro/>), ICI Mod. 8640 série P (<https://infraredcameras.com/thermal-infrared-products/8640-p-series/>). Ambas as fabricantes de câmeras térmicas, FLIR (<https://www.flir.com/>) e Infrared Cameras (<https://infraredcameras.com/>), associaram-se à empresa chinesa DJI (<https://www.dji.com/>) para oferecer soluções de imageamento térmico pronto para uso, que inclui uma dessas câmeras acoplada a uma RPA da DJI. Em geral, a RPA tem baixa capacidade de carga e carrega apenas uma câmera por vez. Por questões relacionadas à legislação de segurança nos países fabricantes, tais câmeras, em geral, têm baixa taxa de reno-

vação de quadros, na faixa de 9-30 Hz, quando o ideal seria em torno de 60 Hz. Além disso, o erro na medição da temperatura pode chegar a ± 5 °C, enquanto nas câmeras mais precisas esse erro não passa de ± 1 °C. Por fim, essas câmeras geram apenas imagens térmicas, sem a correspondente imagem visível, o que dificulta a discriminação dos pixels de plantas no momento do processamento. Então o ideal é construir uma solução customizada específica para a aplicação que se pretende, em que possam ser embarcadas câmeras mais precisas e com menor custo/benefício (Chapman et al., 2014; Hoffmann et al., 2016; Casari et al., 2019). Casari et al. (2019), por exemplo, embarcaram uma câmera térmica Flir Mod. T-420 em uma RPA Xfly S800 para avaliação de plantas de milho submetidas a estresse por déficit hídrico (Figura 1). Essa solução também tem sido utilizada para avaliação de densidade de plantio, deficiência de nutrientes e lâminas de irrigação na cultura do milho, além da avaliação de genótipos de cana-de-açúcar para tolerância à seca.

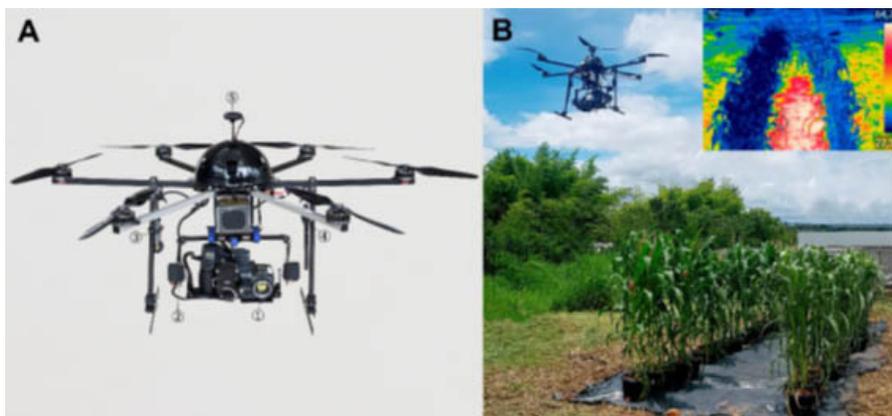


Figura 1. Solução construída em laboratório para a tomada de imagens térmicas aéreas. (A) Aeronave remotamente pilotada com uma câmera térmica embarcada: 1. Termovisor; 2. Cardan (gimbal); 3. Transmissor de vídeo; 4. Transmissor dos dados de voo; 5. GPS e bússola; (B) Sobrevoos da RPA na área experimental para captura das imagens térmica (acima) e visível (abaixo).

Fonte: Casari et al. (2019).

Horário do dia para a captura de imagens térmicas em plantas

A princípio, definir o horário do dia para a avaliação de plantas utilizando-se uma câmera térmica parece não ter importância. Realmente, a imagem pode ser tomada em qualquer horário do dia. No entanto isso depende do objetivo da sua aplicação. A avaliação de plantas por imagens térmicas tem sido realizada especialmente para a discriminação de genótipos de plantas visando à tolerância à seca (Casari et al., 2019) ou à salinidade (Sirault et al., 2009) ou para a determinação do estado hídrico das plantas (Bian et al., 2019). Em todos esses casos, a resposta mais efetiva das plantas está relacionada ao movimento estomático de abertura/fechamento, com a consequente alteração da temperatura foliar (Sirault et al., 2009; Casari et al., 2019). Em condições de campo, o fechamento estomático é mais efetivo quanto maior for a demanda transpiratória. Isso normalmente ocorre quando as diferenças na condutância estomática são máximas. Em plantas estressadas no campo, é possível observar diferenças na temperatura da copa devido à seca ou salinidade em boa parte do dia. No entanto, no início da manhã ou no final da tarde, a leitura da temperatura da copa como um todo é mascarada pela inclinação do sol, uma vez que parte da copa das plantas está recebendo os raios solares diretamente e a outra parte está sombreada. Jones et al. (2002) demonstraram esse efeito ao avaliarem a temperatura da copa de um parreiral. Eles observaram que houve uma diferença na temperatura das folhas de sol e sombra, independentemente do estado hídrico. Por conta disso, se o objetivo é avaliar o estado hídrico, é preferível tomar as medidas mais próximo ao meio dia, quando o sol se encontra no zênite e as plantas estão expressando o máximo de diferença possível, devido à alta demanda transpiratória (Bian et al., 2019; Casari et al., 2019). A tomada da imagem deve ser realizada com o ângulo o mais próximo possível da normal, para que o sensor térmico seja sensibilizado igualmente por folhas localizadas em toda a extensão da copa, as quais se encontram numa mesma posição não apenas em relação ao sensor, mas também em relação ao sol.

Processamento de imagens térmicas para extração de temperatura do objeto-alvo

Depois de obtidas, em geral, as imagens térmicas necessitam de uma fase de processamento para separar os pixels do objeto-alvo, no caso a copa das plantas, de quaisquer contaminantes presentes na imagem. No entanto a segmentação direta dos pixels a partir da imagem térmica é dificultada pela baixa resolução espacial das câmeras térmicas (Liebisch et al., 2015). Para contornar esse problema, a literatura tem descrito vários protocolos nos quais foram aplicadas diferentes abordagens. Usando-se o software proprietário do fabricante da câmera, alguns autores, por exemplo, simplesmente escolheram algumas folhas da copa das plantas, a partir das quais extraíram a temperatura média (Liu et al., 2011; García-Tejero et al., 2017). Sirault et al. (2009), por sua vez, em condições estritamente controladas, usaram um segundo plano que se aquecia mais do que as folhas das plantas, possibilitando a segmentação dos pixels com base em um filtro de temperatura. Outros autores optaram por desenhar figuras geométricas no perímetro da copa das plantas e extrair a temperatura dos pixels dentro delas (Prashar et al., 2013; Zia et al., 2013; Deery et al., 2016). Essa solução simples de segmentação dos pixels funciona muito bem em condições de campo, mas apenas quando a copa das plantas cobre totalmente o solo.

Os protocolos de processamento de imagem térmica assumem grande importância em situações nas quais a copa das plantas não cobre totalmente a parcela experimental no campo (Munns et al., 2010; Liebisch et al., 2015). Nesse caso, a imagem obtida é composta de pixels pertencentes às plantas, pixels do *background*, especialmente do solo, e pixels mistos, ou seja, aqueles pixels que cobrem áreas das folhas e do *background* (Prashar; Jones, 2014). A segmentação dos pixels, portanto, torna-se imprescindível para se obter melhor acurácia na determinação da temperatura da copa das plantas. Para encaminhar essa questão, Deery et al. (2016) propuseram a exclusão um tanto arbitrária dos pixels mais quentes e dos mais frios. Com o uso desse artifício, é muito provável que entre os pixels descartados es-

tivessem pixels pertencentes à copa das plantas. Usando um protocolo de segmentação de pixels mais sofisticado, Leinonen e Jones (2004) alinharam os pixels das imagens RGB e térmica, determinaram os pixels de plantas na imagem RGB e extraíram a temperatura desses pixels na imagem térmica. Aplicou-se uma abordagem similar para a discriminação de pixels de folhas de milho, com a vantagem de ter feito isso em um software aberto, disponível a qualquer usuário, cuja metodologia está descrita em Casari et al. (2019).

Índices gerados para avaliação das plantas a partir da temperatura da copa

Visando normalizar a temperatura da copa e possibilitar a comparação das plantas submetidas a diferentes tratamentos em diferentes imagens, têm sido utilizados vários índices térmicos (Jones et al., 2002; Rosyara et al., 2008; Hoffmann et al., 2016). Entre os mais comumente utilizados estão a *canopy temperature depression* ou *CTD* (Reynolds et al., 1998) e o *Crop Water Stress Index* ou *CWSI* (Jones et al., 2002; Romano et al., 2011; Bian et al., 2019). A *CTD* relaciona a temperatura real da copa (T_c) obtida pela câmera térmica com a temperatura do ar (T_{ar}), medida simultaneamente em uma estação meteorológica, conforme a equação 6:

$$CTD = T_{ar} - T_c \quad (6)$$

Assim quanto maior a *CTD*, mais tolerante à seca e mais produtiva é a planta (Reynolds et al. 1998). Segundo Reynolds et al. (1999), são tantos fatores da planta e do ambiente associados à *CTD*, de forma que não há somente uma correlação fenotípica desse índice com o rendimento de grãos em trigo, mas também uma correlação genética, o que significa que ambos são governados pelos mesmos genes. Por isso a *CTD* tem sido bastante utilizada como critério de seleção para tolerância à seca ou a altas temperaturas em programas de melhoramento genético de trigo (Rosyara et al., 2008).

O *CWSI*, por sua vez, relaciona a temperatura real da copa (T_c) com a temperatura da copa em condições úmidas (T_u) e em condições secas (T_s) e tem alta correlação com a condutância estomática (Leinonen; Jones, 2004). T_u e T_s são as temperaturas-limite inferior e superior, as quais representam uma folha totalmente transpirante, com estômatos abertos, e uma folha não transpirante, com estômatos fechados, respectivamente. *CWSI* é representado pela equação 7 (Bian et al., 2019):

$$CWSI = \frac{(T_c - T_u)}{(T_s - T_u)} \quad (7)$$

As temperaturas seca e úmida têm sido obtidas de várias maneiras (Möller et al., 2007; Romano et al., 2011; Costa et al., 2013; Bian et al., 2019). Jones et al. (2002) propuseram a obtenção da temperatura máxima de referência ou temperatura seca (T_s) pela aplicação de uma camada de vaselina às folhas para impedir totalmente as trocas gasosas. Para a temperatura úmida (T_u), aqueles autores sugeriram aspergir água às folhas para torná-las túrgidas e abrir completamente os estômatos. Romano et al. (2011) utilizaram, para a temperatura úmida (T_u), a temperatura do bulbo úmido do ar ambiente, representando a menor temperatura alcançável pelas folhas de plantas totalmente irrigadas. Para a temperatura seca (T_s), aqueles autores consideraram a temperatura do ar ambiente acrescida de 5 °C, representando a maior temperatura alcançada por uma superfície foliar não transpirante, ou seja, com os estômatos fechados. Möller et al. (2007) encontraram a maior correlação entre as trocas gasosas foliares e o *CWSI*, quando o mesmo foi calculado usando-se como T_u a temperatura de uma superfície artificial úmida. Mais recentemente, trabalhando com plantas de algodão submetidas a diferentes níveis de estresse por déficit hídrico, Bian et al. (2019) calcularam o *CWSI* por meio de três maneiras diferentes para a obtenção das temperaturas máxima (T_s) e mínima (T_u). Além do método descrito acima por Jones et al. (2002) e do método descrito por Romano et al. (2011) – com a diferença de que a T_u foi obtida pela média de 5% das tem-

peraturas mais baixas da copa – eles desenvolveram o que chamaram de método simplificado. Neste, a partir do histograma de frequência da temperatura da copa das plantas, eles calcularam a T_u como a média de 0,5% dos pixels mais frios e a T_s como a média de 0,5% dos pixels mais quentes. Eles observaram que o $CWSI$ calculado por esse último método apresentou a mais alta correlação com a condutância estomática, com a taxa de transpiração e com os índices vegetativos, entre os quais o índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI), o qual é um dos mais utilizados para a avaliação de plantas.

Considerações finais

Atualmente, o mundo tem assistido a uma escalada na demanda por métodos modernos de fenotipagem de plantas por sensoriamento remoto, em substituição aos métodos tradicionais. Estes se caracterizam pela obtenção de características facilmente mensuráveis, com base em peso e tamanho, utilizando-se ferramentas que demandam tempo, recursos financeiros e mão de obra. Aqueles, por outro lado, usam sensores de última geração, automatizados, rápidos, precisos e avaliam características mais complexas, a custos mais baixos. O desenvolvimento de novas câmeras portáteis, mais leves e versáteis, além de aeronaves remotamente pilotadas, as quais têm maior capacidade de carga e maior autonomia de voo, prometem revolucionar o setor. Tais avanços abrem muitas oportunidades para a aplicação na agricultura de precisão. No entanto, é essencial que essas novas tecnologias que estão surgindo sejam utilizadas corretamente para transmitir confiabilidade aos dados. A correta configuração inicial, a forma de captura do dado, o processamento e a interpretação são fundamentais para a confiabilidade dos resultados.

Além da Embrapa e de várias instituições e empresas internacionais que têm desenvolvido pesquisas na área de fenotipagem avançada, dezenas de *startups* têm sido criadas para a prestação de serviços. A automação e di-

gitalização do processo de fenotipagem de plantas está acontecendo agora e vai intensificar-se no futuro próximo. Para a termografia, em particular, os avanços têm sido enormes no que concerne à instrumentação e no desenvolvimento de protocolos de avaliação de plantas. No entanto os principais índices térmicos desenvolvidos pela pesquisa ainda não satisfazem plenamente os critérios de confiabilidade para uso em larga escala. Isso porque as suas correlações com as características das plantas, tais como, condutância estomática e principalmente rendimento, apesar de significativas, ainda têm sido consideradas baixas em condições de campo. É importante enfatizar, no entanto, que a abordagem de qualquer estresse com um único sensor sempre terá suas limitações, uma vez que o estresse é um evento complexo, sendo influenciado por diversas características morfofisiológicas. Conseqüentemente, para melhorar tais correlações, é necessário realizar mais estudos para o aprimoramento da fórmula de cálculo dos principais índices térmicos, seja pela incorporação de outras características de plantas que ajudam na regulação da temperatura foliar, seja pela associação com outros tipos de sensores, tais como, multiespectrais, hiperespectrais e de fluorescência da clorofila.

Referências

- AWAD, M. M. Toward precision in crop yield estimation using remote sensing and optimization techniques. **Agriculture**, v. 9, n. 3, e54, 2019. DOI: 10.3390/agriculture9030054.
- BIAN, J.; ZHANG, Z.; CHEN, J.; CHEN, H.; CUI, C.; LI, X.; CHEN, S.; FU, Q. Simplified evaluation of cotton water stress using high resolution unmanned aerial vehicle thermal imagery. **Remote Sensing**, v. 11, n. 3, e267, 2019. DOI: 10.3390/rs11030267.
- BUDIYONO, A. Advances in unmanned aerial vehicles technologies. **Chinese Science Bulletin**, v. 22, n. 1, p. 1-13, 2007.
- CASARI, R. A. C. N.; PAIVA, D. S. de; SILVA, V. N. B.; FERREIRA, T. M. M.; SOUZA JUNIOR, M. T.; OLIVEIRA, N. G.; KOBAYASHI, A. K.; MOLINARI, H. B. C.; SANTOS, T. T.; GOMIDE, R. L.; MAGALHÃES, P. C.; SOUSA, C. A. F. de. Using thermography to confirm genotypic variation for drought response in maize. **International Journal of Molecular Science**, v. 20, n. 9, e2273, 2019. DOI: 10.3390/ijms20092273.

CHAEERLE, L.; VAN DER STRAETEN, D. Imaging techniques and the early detection of plant stress. **Trends in Plant Science**, v. 5, n. 11, p. 495-501, 2000.

CHAPMAN, S. C.; MERZ, T.; CHAN, A.; JACKWAY, P.; HRABAR, S.; DRECCER, M. F.; HOLLAND, E.; ZHENG, B.; LING, J.; JIMENEZ-BERNI, J. Pheno-copter: a low-altitude, autonomous remote-sensing robotic helicopter for high-throughput field-based phenotyping. **Agronomy**, v. 4, n. 2, p. 279-301, 2014. DOI: 10.3390/agronomy4020279.

COSTA, J. M.; GRANT, O. M.; CHAVES, M. M. Thermography to explore plant–environment interactions. **Journal of Experimental Botany**, v. 64, n. 13, p. 3937-3949, 2013.

DEERY, D. M.; REBETZKE, G. J.; JIMENEZ-BERNI, J. A.; JAMES, R. A.; CONDON, A. G.; BOVILL, W. D.; HUTCHINSON, P.; SCARROW, J.; DAVY, R.; FURBANK, R. T. Methodology for high-throughput phenotyping of canopy temperature using airborne thermography. **Frontiers in Plant Science**, v. 7, e1808, Dec. 2016. DOI: 10.3389/fpls.2016.01808.

EL SGHAIR, M.; JOVANOVIĆ, R.; TUBA, M. An algorithm for plant diseases detection based on color features. **International Journal of Agricultural Science**, v. 2, 2017. Disponível em: [http://www.iiar.org/iiaras/filedownloads/ijas/2017/014-0001\(2017\).pdf](http://www.iiar.org/iiaras/filedownloads/ijas/2017/014-0001(2017).pdf). Acesso em: 20 jul. 2020.

ENDERS, T. A.; DENNIS, S. S.; OAKLAND, J.; CALLEN, S. T.; GEHAN, M. A.; MILLER, M. D.; SPALDING, E. P.; SPRINGER, N. M.; HIRSCHA, C. D. Classifying cold stress responses of inbred maize seedlings using RGB imaging. **Plant Direct**, v. 3, n. 1, e00104, Jan. 2019. DOI: 10.1002/pld3.104.

GARCÍA-TEJERO, I. F.; HERNÁNDEZ-COTÁN, A.; APOLO, O. E.; DURÁN-ZUAZO, V. H.; PORTERO, M. A.; RUBIO-CASAL, A. E. Infrared thermography to select commercial varieties of maize in relation to drought adaptation. **Quantitative InfraRed Thermography Journal**, v. 14, n. 1, p. 54-67, 2017. DOI: 10.1080/17686733.2016.1229327.

HOFFMANN, H.; JENSEN, R.; THOMSEN, A.; NIETO, H.; RASMUSSEN, J.; FRIBORG, T. Crop water stress maps for an entire growing season from visible and thermal UAV imagery. **Biogeosciences**, v. 13, p. 6545-6563, 2016. DOI: 10.5194/bg-13-6545-2016.

ISLAM, M. R.; BAOHUA, F.; TINGTING, C.; LONGXING, T.; GUANFU, F. Role of abscisic acid in thermal acclimation of plants. **Journal of Plant Biology**, v. 61, n. 5, p. 255-264, 2018.

JONES, H. G.; STOLL, M.; SANTOS, T.; SOUSA, C.; CHAVES, M. M.; GRANT, O. M. Use of infrared thermography for monitoring stomatal closure in the field: Application to grapevine. **Journal of Experimental Botany**, v. 53, n. 378, p. 2249-2260, 2002.

LAPRAY, P. J.; WANG, X.; THOMAS, J. B.; GOUTON, P. Multispectral filter arrays: recent advances and practical implementation. **Sensors**, v. 14, n. 11, p. 21626-21659, 2014. DOI: 10.3390/s141121626.

LEINONEN, I.; JONES, H. G. Combining thermal and visible imagery for estimating canopy temperature and identifying plant stress. **Journal of Experimental Botany**, v. 55, n. 401, p. 1423-1431, June 2004.

LIEBISCH, F.; KIRCHGESSNER, N.; SCHENEIDER, D.; WALTER, A.; HUND, A. Remote, aerial phenotyping of maize traits with a mobile multi-sensor approach. **Plant Methods**, v. 11, n. 9, p. 1-19, 2015.

LIU, Y.; SUBHASH, C.; YAN, J.; SONG, C.; ZHAO, J.; LI, J. Maize leaf temperature responses to drought: Thermal imaging and quantitative trait loci (QTL) mapping. **Environmental and Experimental Botany**, v. 71, n. 2, p. 158-165, 2011.

MIRANDA, J. L.; GERARDO, B. D.; TANGUILIG III, B. T. Pest detection and extraction using image-processing techniques. **International Journal of Computer and Communication Engineering**, v. 3, n. 3, p. 189-192, May 2014.

MÖLLER, M.; ALCHANATIS, V.; COHEN, Y.; MERON, M.; TSIPRIS, J.; NAOR, A.; OSTROVSKY, V.; SPRINTSIN, M.; COHEN, S. Use of thermal and visible imagery for estimating crop water status of irrigated grapevine. **Journal of Experimental Botany**, v. 58, n. 4, p. 827-838, 2007.

MUNNS, R.; JAMES, R. A.; SIRAUULT, X. R. R.; FURBANK, R. T.; JONES, H. G. New phenotyping methods for screening wheat and barley for beneficial responses to water deficit. **Journal of Experimental Botany**, v. 61, n. 13, p. 3499-3507, 2010. DOI: 10.1093/jxb/erq199.

OLIVEIRA, H. C.; GUIZILINI, V. C.; NUNES, I. P.; SOUZA, J. R. Failure detection in row crops from UAV images using morphological operators. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters**, v. 15, n. 7, p. 991-995, 2018.

PADMAVATHI, K.; THANGADURAI, K. Implementation of RGB and grayscale images in plant leaves disease detection – comparative study. **Indian Journal of Science and Technology**, v. 9, n. 6, Feb. 2016. DOI: 10.17485/ijst/2016/v9i6/77739.

PRASHAR, A.; JONES, H. G. Infrared thermography as a high-throughput tool for field phenotyping. **Agronomy**, v. 4, n. 3, p. 397-417, 2014. DOI: 10.3390/agronomy4030397.

PRASHAR, A.; YILDIZ, J.; McNICOL, J. W.; BRYAN, G. J.; JONES, H. G. Infra-red thermography for high throughput field phenotyping in *Solanum tuberosum*. **PLoS One**, v. 8, n. 6, e65816, 2013. DOI: 10.1371/journal.pone.0065816.

QIAN, J.; XING, B.; WU, X.; CHEN, M.; WANG, Y. A smartphone-based apple yield estimation application using imaging features and the ANN method in mature period. **Scientia Agricola**, v. 75, n. 4, p. 273-280, 2018.

RADIOMETRIC temperature measurements: technical note. Wilsonville: FLIR Systems, 2016. 3 p. (FLIR. The world's sixth sense). Disponível em: https://dl.djicdn.com/downloads/zenmuse_xt/en/sUAS_Radiometry_Technical_Note.pdf. Acesso em: 9 set. 2019.

REYNOLDS, M. P.; RAJARAM, S.; SAYRE, K. D. Physiological and genetic Changes of irrigated wheat in the post-green revolution period and approaches for meeting projected global demand. **Crop Science**, v. 39, n. 6, p. 1611-1621, 1999.

REYNOLDS, M. P.; SINGH, R. P.; IBRAHIM, A.; AGEEB, O. A. A.; LARQUE-SAAVE-DRA, A.; QICK, J. S. Evaluation of physiological traits to complement empirical selection for wheat in warm environments. **Euphytica**, v. 100, n. 1-3, p. 85-94, 1998.

ROMANO, G.; ZIA, S.; SPREER, W.; SANCHEZ, C.; CAIRNS, J.; ARAUS, J. L.; MÜLLER, J. Use of thermography for high throughput phenotyping of tropical maize adaptation in water stress. **Computer and Electronic in Agriculture**, v. 79, n. 1, p. 67-74, 2011. DOI: 10.1016/j.compag.2011.08.011.

ROSYARA, U. R.; VROMMAN, D.; DUVEILLER, E. Canopy temperature depression as an indication of correlative measure of spot blotch resistance and heat stress tolerance in spring wheat. **Journal of Plant Pathology**, v. 90, n. 1, p. 103-107, 2008.

SAGAN, V.; MAIMAITIJIANG, M.; SIDIKE, P.; EBLIMIT, K.; PETERSON, K. T.; HARTLING, S.; ESPOSITO, F.; KHANAL, K.; NEWCOMB, M.; PAULI, D.; WARD, R.; FRITSCHI, F.; SHAKOOR, N.; MOCKLER, T. UAV-based high resolution thermal imaging for vegetation monitoring, and plant phenotyping using ICI 8640 P, FLIR Vue Pro R 640, and thermoMap cameras. **Remote Sensing**, v. 11, n. 3, e330, 2019. DOI: 10.3390/rs11030330.

SIRAULT, X. R. R.; JAMES, R. A.; FURBANK, R. T. A new screening method for osmotic component of salinity tolerance in cereals using infrared thermography. **Functional Plant Biology**, v. 36, n. 11, p. 970-977, 2009.

USAMENTIAGA, R.; VENEGAS, P.; GUEREDIAGA, J.; VEGA, L.; MOLLEDA, J.; BULNES, F. G. Infrared thermography for temperature measurement and non-destructive testing. **Sensors**, v. 14, n. 7, p. 12305-12348, 2014.

ZIA, S.; ROMANO, G.; SPREER, W.; SANCHEZ, C.; CAIRNS, J.; ARAUS, J. L.; MÜLLER, J. Infrared thermal imaging as a rapid tool for identifying water-stress. tolerant maize genotypes of different phenology. **Journal of Agronomy and Crop Science**, v. 199, n. 2, p. 75-84, 2013.

Embrapa

Meio-Norte

MINISTÉRIO DA
AGRICULTURA, PECUÁRIA
E ABASTECIMENTO



PÁTRIA AMADA
BRASIL
GOVERNO FEDERAL