

Utilização de imagens térmicas adquiridas por veículos aéreos não tripulados em aplicações agrícolas

Luís PÁDUA¹, Telmo ADÃO^{1,2}, Emanuel PERES^{1,2} e Joaquim João SOUSA^{1,2}

¹ Escola de Ciências e Tecnologia, Universidade de Trás os Montes e Alto Douro, Vila Real

² Instituto de Engenharia de Sistemas e Computadores, Tecnologia e Ciência (INESC TEC), Porto

(luispadua@utad.pt; telmoadao@utad.pt; eperes@utad.pt; jjsousa@utad.pt)

Palavras-chave: imagem térmica, stress hídrico, agricultura, veículos aéreos não tripulados, processamento fotogramétrico

Resumo:

O crescente aumento populacional causou a necessidade de estender áreas de produção agrícola, o que, conseqüentemente, leva ao aumento do uso de recursos hídricos. Esse facto, aliado ao aumento da temperatura global e a menores períodos de precipitação, tem feito aumentar os casos de stress hídrico. Para otimizar o uso da água, recurso cada vez mais escasso, a gestão da irrigação torna-se importante. Como tal, o estado hídrico das culturas agrícolas deve ser avaliado, através de alternativas mais flexíveis do que as atualmente empregues. Neste contexto, os veículos aéreos não tripulados (VANT) surgem como uma forma rápida e eficaz de, através do uso de sensores térmicos, adquirir e fornecer dados, quase em tempo real, permitindo, a avaliação do *stress* hídrico em culturas agrícolas. Este estudo tem como objetivo apresentar técnicas de aquisição, processamento e interpretação de imagens térmicas adquiridas por VANT para aplicações agrícolas. Como caso de estudo, foi realizado um levantamento aéreo numa área agrícola, usando-se um VANT de asa-fixa para aquisição de imagens térmicas, sendo analisadas duas culturas diferentes, milho e vinha. Os dados adquiridos foram usados numa pipeline de processamento fotogramétrico para esse tipo de imagem, gerando-se resultados importantes que fornecem um contexto do estado hídrico das plantas, de uma forma eficiente, demonstrando o potencial para apoio aos agricultores em operações de gestão agrícola.

1. Introdução

Estima-se que 70% de toda a água consumida é utilizada no setor agrícola, esperando-se, também, até 2050, um aumento de 70% na produção alimentar (Gilbert, 2012). De acordo com os objetivos de desenvolvimento sustentável, definidos pela Organização das Nações Unidas, até 2030, pretende-se aumentar a eficiência do uso da água em todos os setores, assegurando-se extrações sustentáveis e a implementação de uma gestão integrada dos recursos hídricos a todos os níveis (United Nations, 2015). Tendo em vista o facto das alterações climáticas levarem a uma diminuição de precipitação e a períodos de seca mais frequentes (Schmidhuber e Tubiello, 2007), a gestão dos recursos hídricos destinados à irrigação tornou-se um assunto fundamental com vista a uma agricultura sustentável. Assim sendo, torna-se crucial realizar uma gestão de irrigação mais controlada (Gago *et al.*, 2015), sendo requerida uma análise eficiente do estado hídrico das culturas agrícolas.

Desta forma, os veículos aéreos não tripulados (VANT), surgem como uma alternativa flexível para aquisição de dados de deteção remota no contexto de agricultura de precisão, fornecendo uma maior flexibilidade que outras plataformas de deteção remota. Os VANT podem transportar diferentes tipos de sensores para aquisição de dados como RGB, multiespectrais, térmicos e LIDAR (Pádua *et al.*, 2017), sendo os três primeiros de crucial importância no contexto agrícola. Enquanto que os sensores multiespectrais adquirem sobretudo informação do espectro eletromagnético na zona visível e de infravermelho próximo (400 até 1000 nm) os dados provenientes de sensores térmicos adquirem informação na zona do infravermelho distante (5000 a 18000 nm), assim, o valor reflexão de cada pixel pode ser transformado em temperatura (Pádua *et al.*, 2017).

Nesta comunicação pretende-se apresentar um caso de estudo explorando o uso de imagens térmicas adquiridas por VANT em contexto agrícola. Para tal, foi realizada uma série de voos, com recurso a um VANT de asa-fixa, para aquisição de imagens térmicas, que, posteriormente, foram submetidas a processamento fotogramétrico para a criação de produtos ortorretificados para avaliar potenciais efeitos de *stress* hídrico nas duas culturas analisadas neste estudo (vinha e milho). Neste tipo de aplicações, a termografia baseia-se na determinação da temperatura das folhas das plantas e do nível de abertura/fecho estomático. O processo de evapotranspiração faz com que haja perda de água, através dos estômatos, fazendo baixar a temperatura das folhas. No entanto, quando a evapotranspiração é interrompida, por exemplo por falta de água, a temperatura das folhas aumenta. Assim, a temperatura do copado pode ser correlacionada com parâmetros fisiológicos, como por exemplo a condutância estomática.

Os avanços tecnológicos, dos últimos anos, proporcionaram novas oportunidades na aquisição de respostas térmicas de plantas, recorrendo a uma nova geração de sensores, sendo possível avaliar a variação da quantidade de água existente nas culturas agrícolas. Foram propostos vários índices térmicos, capazes de estimar o *stress* hídrico.

2. Índices usados em imagens térmicas para estimar o *stress* hídrico

De forma a melhorar a interpretação de imagens térmicas em contexto agrícola existem diversos índices que podem auxiliar na indicação de potenciais sinais de *stress* em culturas agrícolas. Os principais índices encontrados na bibliografia estão apresentados no Quadro 1, juntamente com a equação que permite o seu cálculo e a referência dos estudos em que foram originalmente propostos.

Quadro 1 – Índices utilizados em dados térmicos para detecção de sinais de *stress* hídrico na agricultura

Índice	Equação	Referência
<i>Crop Water Stress Index</i>	$CWSI = \frac{T_{canopy} - T_{wet}}{T_{dry} - T_{wet}}$	(Idso <i>et al.</i> , 1981)
<i>Stomatal conductance index</i>	$IG = \frac{T_{dry} - T_{canopy}}{T_{canopy} - T_{wet}}$	(Jones, 1999)
<i>Stomatal conductance index</i>	$I3 = \frac{T_{canopy} - T_{wet}}{T_{dry} - T_{canopy}}$	(Jones, 1999)

Estes índices baseiam-se na utilização da temperatura da vegetação em análise, T_{canopy} , e na utilização de um limiar de temperaturas, T_{dry} e T_{wet} , sendo estes valores correspondentes aos valores limite (superior e inferior) de temperatura, podendo ser obtidos diretamente no campo ou, se os dados o permitirem, através das imagens térmicas adquiridas pelo VANT (Matese *et al.*, 2018). O índice *Crop Water Stress Index* (CWSI) é um dos mais utilizados, variando entre valores de 0 (sem sinais de *stress*) e 1 (altos níveis de *stress*). Os índices relativos à condutância estomática (IG e I3), também estão relacionados com a detecção de potencial *stress* em culturas agrícolas. IG está diretamente relacionado com a condutância estomática, já I3 está correlacionado com a resistência estomática (Gago *et al.*, 2015). Este tipo de índices constitui uma forma prática de estimar o estado hídrico das culturas, sendo utilizados em culturas como olival (Berni, Zarco-Tejada, Sepulcre-Cantó, Fereres, & Villalobos, 2009), vinha (Bellvert *et al.*, 2013), algodão (Sullivan *et al.*, 2007), trigo (Banerjee *et al.*, 2018), arroz (Liu *et al.*, 2018), beterraba (Quebrajo *et al.*, 2018) e milho (Romano *et al.*, 2011).

3. Caso de estudo

Nesta secção é apresentado um caso de estudo para a aquisição, processamento e interpretação de dados térmicos adquiridos por VANT. Foram utilizadas parcelas de vinha e uma plantação de milho, pertencentes à Quinta de Nossa Senhora de Lourdes, localizada no campus da Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, como apresentado na Figura 1. No que se refere às condições meteorológicas observadas, durante o decorrer do estudo, é de salientar não existiu qualquer período de precipitação significativa, sendo que a área de vinha não contém qualquer tipo de sistema de irrigação, enquanto que outras culturas presentes foram irrigadas, através de um sistema de irrigação de gotejamento.

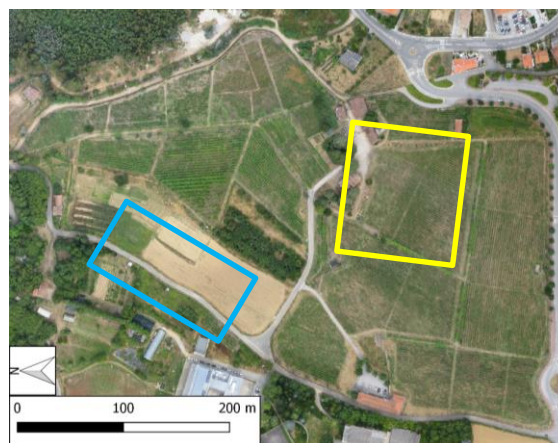


Figura 1 – Visão geral da área de estudo, maioritariamente composta por vinha. Os retângulos assinalados são as áreas de estudo analisadas, a amarelo as parcelas de vinha e a azul a plantação de milho

3.1 Aquisição de dados

A aquisição de dados foi realizada recorrendo-se ao VANT de asa fixa, modelo eBee (senseFly SA, Lausanne, Suíça), capaz de suportar diferentes tipos de sensores para aquisição de dados (RGB, multiespectrais e térmicos). Para a realização deste estudo foi utilizado o sensor thermoMAP (senseFly SA, Lausanne, Suíça), desenhado para operar entre 75 e 150 metros de altura, fornecendo imagens georreferenciadas com uma resolução 640x512 e a sua resolução de temperatura é de 0.1°C. A calibração do sensor é realizada, automaticamente, durante o voo, e opera nas gamas do infravermelho térmico, entre os 7500 nm e os 13500 nm.

Foi realizada uma série de quatro voos, sobre a área em estudo, no período temporal de um mês, entre 6 de julho e 6 de agosto de 2018, a uma altura de voo de 75 m, com uma resolução ao solo de cerca de 17 cm. A área total sobrevoada foi de cerca de 35 ha, e cada voo teve uma duração de cerca de 17 minutos, com uma sobreposição longitudinal de 90% e lateral de 75%, tendo-se adquirido aproximadamente 3500 imagens por voo. Todos os voos foram realizados próximo do meio dia solar.

No que concerne às temperaturas do ar, no intervalo que mediou os dois primeiros voos, a temperatura média diária registada foi de 21.7 °C, tendo, a máxima, atingido 30.4 °C e a mínima 14.8 °C. No espaço temporal do segundo para o terceiro voo, houve um ligeiro decréscimo da temperatura do ar, com uma média do ar de 20.1 °C, máxima de 29.2 °C e mínima de 12.7 °C. Do terceiro para o quarto voo, houve um aumento de temperatura significativo, com uma média de 26.5 °C, máxima de 36.3 °C e mínima de 18.3 °C. Estes dados foram obtidos de uma estação meteorológica situada a cerca de 100 m da área de estudo.

Os valores de T_{wet} e T_{dry} foram obtidos através de um termómetro infravermelho (Shenzhen Jumaoyuan Science And Technology Co., Ltd., Shenzhen, China), operando entre os 8000 nm e 14000 nm e com uma precisão de ± 1.5 °C. T_{wet} foi obtido molhando-se várias folhas com água e medindo a sua temperatura, já os valores de T_{dry} foram obtidos através da aplicação de vaselina em ambas as partes de folhas de videira e após alguns minutos de exposição solar a sua temperatura foi registada, adotando-se o método descrito por Matese e Di Gennaro (2018).

3.2 Processamento de dados

Os dados adquiridos foram sujeitos a processamento fotogramétrico utilizando um *software* dedicado para o efeito - o Pix4Dmapper Pro (Pix4D SA, Lausanne, Suíça) - para a criação de produtos ortorretificados, sendo que, neste caso, se pretendia a criação de mosaicos representando a temperatura da superfície. As imagens georreferenciadas adquiridas foram processadas numa workstation com dois CPU Intel Xeon CPU E5-2680 v4 @ 2.40GHz, 128 GB de memória RAM, duas GPU NVIDIA Quadro M4000 e um disco SSD Samsung Evo 850 de 1 TB de memória.

Na Figura 2 apresentam-se os mosaicos de temperatura da superfície correspondentes aos quatro voos efetuados. Relativamente ao desempenho da workstation utilizada, e descrita anteriormente, em média foram necessárias 2h e 50 min para a obtenção da nuvem de pontos esparsa. Este tempo, consideravelmente elevado quando comparado com o processamento fotogramétrico de imagens RGB para a mesma área, deve-se ao elevado número de imagens adquiridas, tendo estas que ser analisadas individualmente para a determinação de pontos comuns entre as imagens. No que toca à geração da nuvem densa de pontos, este processo demorou cerca de 20 minutos, por grupo de imagens, tendo sido gerados entre 20 e 24 milhões de pontos (>10 pontos/m³). Finalmente, a última fase do processamento, a obtenção do ortofoto mosaico, levou cerca de 15 minutos.

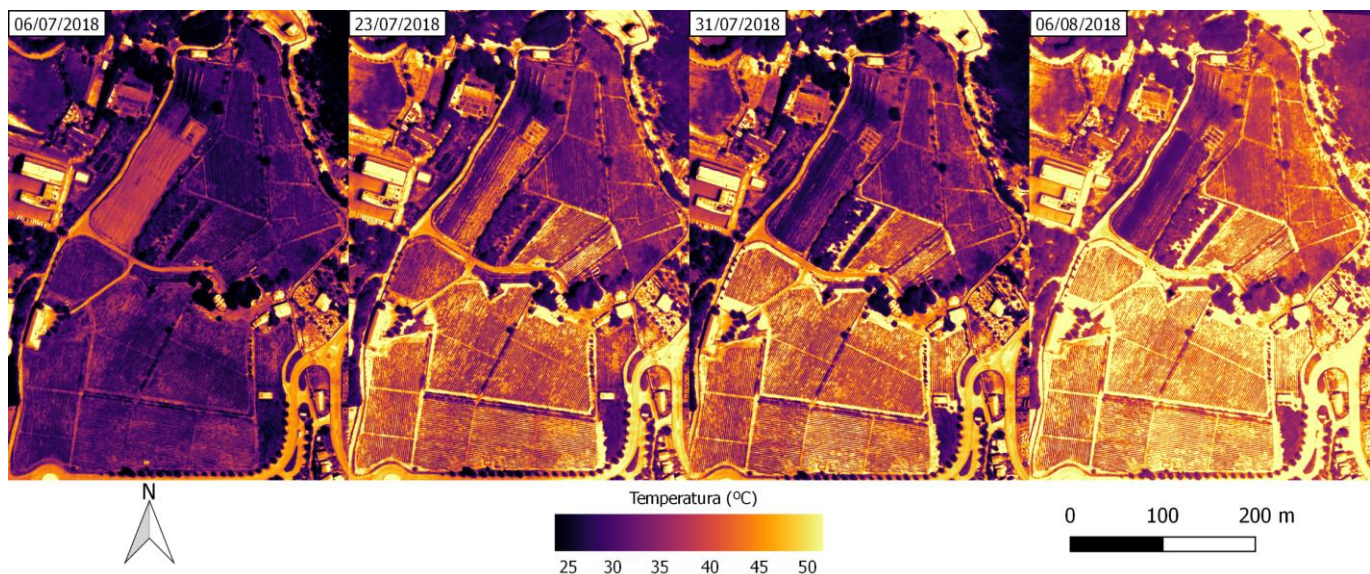


Figura 2 – Representação, a falsa cor, da temperatura da superfície para a área em estudo.

3.3 Resultados

Para minimizar os efeitos provocados pelas diferentes condições de temperatura, ao longo da campanha, foram medidos os limiares de temperatura, segundo o processo anteriormente descrito, para as parcelas de vinha e o valor da temperatura do ar, que foi utilizado na monitorização da plantação de milho.

3.1 – Parcelas de vinha

Para as parcelas de vinha em análise foi gerado o índice CWSI para identificação de potenciais sinais de *stress*, utilizando-se os valores T_{wet} e T_{dry} , adquiridos durante a aquisição das imagens térmicas pelo VANT (Quadro 2). Em seguida aplicou-se a máscara para remoção dos pixels correspondentes ao solo sobre o CWSI, através de uma análise do valor de temperatura do solo, nos dados de cada voo.

Quadro 2 – Valores de temperatura, obtidos no terreno em cada voo para os parâmetros correspondentes aos limiares de temperatura (T_{dry} e T_{wet}) de folhas de videira e da temperatura do ar (T_a)

Parâmetro	06/07/2018	23/07/2018	31/07/2018	06/08/2018
T_{dry} (°C)	32	36	38	44
T_{wet} (°C)	26	30	25	25
T_a (°C)	30.3	32.2	30.5	33.5

A Figura 3 apresenta os resultados obtidos. É claramente visível que não foram detetados sinais de *stress* nos dados provenientes dos dias 6 e 23 de julho de 2018. Já para os dados do dia 31 de julho de 2018 verificou-se uma alteração nos valores de CWSI, especialmente na parcela norte, onde é possível verificar alguns sinais de *stress*. Na parcela sul, a situação, apesar de bastante semelhante, os valores do CWSI são ligeiramente menores. Para os dados recolhidos no dia 06 de agosto de 2018 os valores mantiveram-se semelhantes aos obtidos pelos dados recolhidos no voo de 31 de julho de 2018. Este tipo de índice pode auxiliar os agricultores e vitivinicultores numa inspeção de campo mais célere e eficaz auxiliando na identificação de áreas com sinais de *stress*, facilitando, a tomada de decisão, neste caso no processo de irrigação.

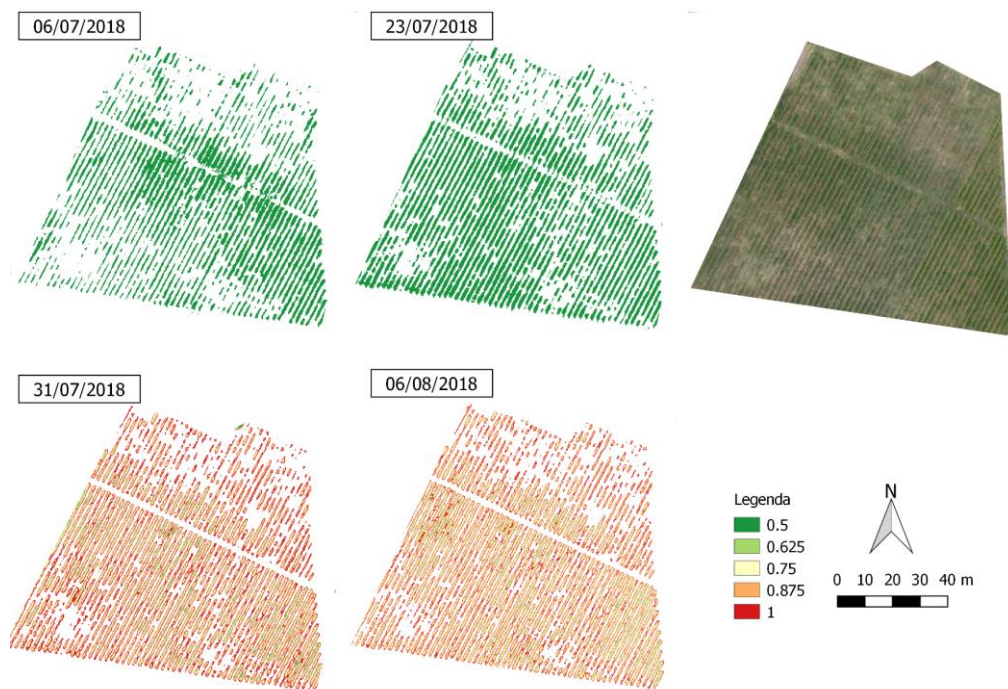


Figura 3 – Mapas a falsa cor de CWSI para os diferentes voos. Para facilitar a interpretação, na parte superior direita da figura, apresenta-se o orto-mosaico RGB.

3.3.2 – Plantação de milho

Para a plantação de milho realizou-se uma subtração da temperatura do ar (T_a) – dados apresentados no Quadro 2 – à temperatura de cada pixel (T_c). As regiões com temperatura mais elevada podem indicar sinais de *stress* hídrico, enquanto que valores negativos – temperatura do ar superior à temperatura do solo/planta – indicam o contrário. Ao contrário da abordagem seguida nas parcelas de vinha, o CWSI não foi utilizado pois os valores de T_{wet} e T_{dry} apenas foram obtidos em folhas de videira, não tendo sido calculados nesta plantação. Os resultados obtidos com a aplicação deste método são apresentados na Figura 4.

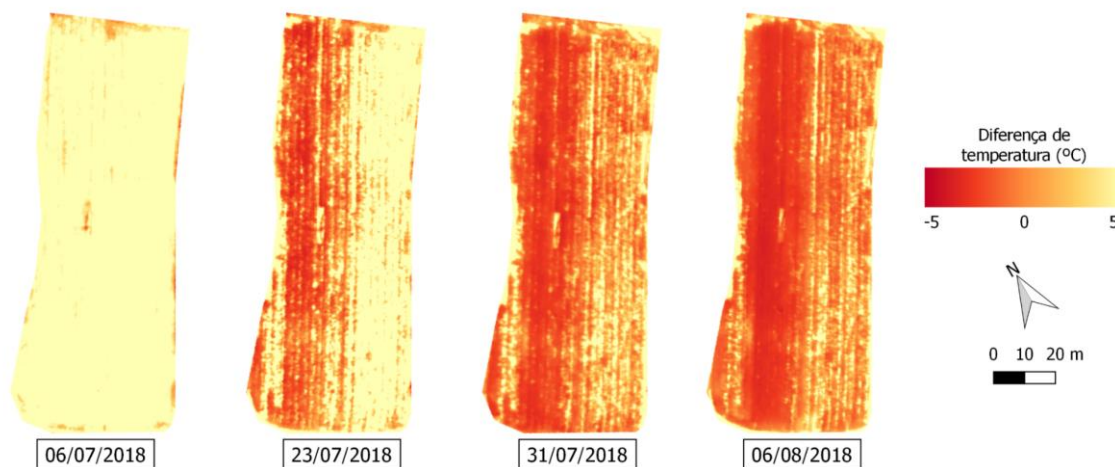


Figura 4 – Mapas a falsa cor da diferença da temperatura observada com a temperatura do ar, à data da realização de cada voo, para a plantação de milho analisada.

No Quadro 3 são apresentados dados relativos à temperaturas máxima, mínima e média, observadas na plantação em análise, bem como a diferença para a temperatura do ar. De forma geral observou-se uma diminuição da temperatura média registada, assim como uma maior área com diferenças inferiores a 0 °C, quando comparados com os valores de temperatura do ar registados. No dia 6 de julho de 2018 observou-se uma diferença superior em relação à temperatura do ar, contudo, estes resultados são justificáveis devido ao estado inicial de maturação das plantas. Com efeito, a densidade foliar e o tamanho iniciais eram relativamente baixos, o que, aliado ao facto do tamanho do pixel (~17 cm), influenciou o resultado. Por sua vez, no dia 23 de julho de 2018, após um período de maior crescimento, as plantas já são notórias nos dados adquiridos. Contudo, existe uma diferença na zona direita da plantação, devido a um défice nutricional no solo. Dos resultados obtidos nos últimos dois voos (31 de julho e 6 de agosto de 2018) verifica-se uma maior uniformidade no terreno, contudo, é notório que no lado direito do terreno continuam a existir sinais de *stress*, influenciando de forma clara o desenvolvimento das plantas existentes nessa zona. Importa salientar que foi implementado um sistema de irrigação nesta parcela e que este já estava em funcionamento à data da realização dos dois últimos voos. Tal situação justifica a diferença da temperatura média, com valores próximos de zero. Desta forma pode-se afirmar que, recorrendo a dados térmicos adquiridos por VANT, é possível verificar-se a variabilidade em culturas e otimizar os tratamentos ou a irrigação, como medida de correção/mitigação da cultura em análise.

Quadro 3 – Temperaturas máxima, média e mínima registadas à hora de cada voo, na plantação de milho analisada e as diferenças destas temperaturas para a temperatura do ar no momento de aquisição dos dados.

Data	Temperatura mínima (°C)	Temperatura média (°C)	Temperatura máxima (°C)	Diferença da temperatura mínima (°C)	Diferença da temperatura média (°C)	Diferença da temperatura máxima (°C)
06/07/2018	28	38	42	-1.8	7.4	12.4
23/07/2018	29	36	50	-3.6	3.7	18.2
31/07/2018	27	31	46	-3.5	0.0	11.5
06/08/2018	30	33	51	-3.8	-0.7	14.0

4. Conclusões

Nesta comunicação, apresentam-se os resultados, ainda preliminares, da utilização da termografia por VANT em aplicações agrícolas, nomeadamente, na vinha e no milho. Os resultados obtidos permitem concluir que a utilização destes dados tem um grande potencial na avaliação do *stress* hídrico das culturas, podendo vir a constituir uma ferramenta fundamental para uma gestão sustentável deste recurso num contexto de irrigação. Para o caso da vinha foi possível verificar-se o declínio dos valores de CSWI. Já para a plantação de milho analisada foi possível verificar, através da diferença da temperatura da superfície para a temperatura do ar, a variabilidade no terreno, podendo-se otimizar a aplicação de tratamentos corretivos para zonas com maior variabilidade. A utilização conjunta de sensores térmicos com outros sensores que podem ser acoplados em VANT no contexto da agricultura de precisão podem potencializar a sua aplicabilidade na monitorização de culturas. Colmatando a baixa resolução espacial que dependendo da cultura em estudo e do seu estado de maturação possam ser analisados erradamente dados não pertencentes a estas.

Agradecimentos

Este trabalho foi financiado pelo Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER) através do Programa Operacional Competitividade e Internacionalização - COMPETE 2020 sob o Acordo de Parceria PORTUGAL 2020, e através da Agência Nacional de Inovação (ANI), como parte do projeto “PARRA – Plataforma integrAda de monitoRização e avaliação da doença da flavescência douRada na vinhA” (Nº 3447) e suportado pelo FEDER e Norte 2020 – Programa Operacional Regional do Norte, como parte do projeto “INNOVINE&WINE – Plataforma de Inovação da Vinha e do Vinho” (NORTE-01-0145-FEDER-000038).

Referências Bibliográficas

- Banerjee, K., Krishnan, P., & Mridha, N. (2018). Application of thermal imaging of wheat crop canopy to estimate leaf area index under different moisture stress conditions. *Biosystems Engineering*, 166(Supplement C), 13–27.
- Bellvert, J., Zarco-Tejada, P. J., Girona, J., & Fereres, E. (2013). Mapping crop water stress index in a 'Pinot-noir' vineyard: comparing ground measurements with thermal remote sensing imagery from an unmanned aerial vehicle. *Precision Agriculture*, 15(4), 361–376.
- Berni, J. A. J., Zarco-Tejada, P. J., Sepulcre-Cantó, G., Fereres, E., & Villalobos, F. (2009). Mapping canopy conductance and CWSI in olive orchards using high resolution thermal remote sensing imagery. *Remote Sensing of Environment*, 113(11), 2003–2014.
- Gago, J., Douthe, C., Coopman, R. E., Gallego, P. P., Ribas-Carbo, M., Flexas, J., ... Medrano, H. (2015). UAVs challenge to assess water stress for sustainable agriculture. *Agricultural Water Management*, 153, 9–19.
- Gilbert, N. (2012). Water under pressure. *Nature*, 483(7389), 256–257.
- Idso, S. B., Jackson, R. D., Pinter, P. J., Reginato, R. J., & Hatfield, J. L. (1981). Normalizing the stress-degree-day parameter for environmental variability. *Agricultural Meteorology*, 24, 45–55. [https://doi.org/10.1016/0002-1571\(81\)90032-7](https://doi.org/10.1016/0002-1571(81)90032-7)
- Jones, H. G. (1999). Use of infrared thermometry for estimation of stomatal conductance as a possible aid to irrigation scheduling. *Agricultural and Forest Meteorology*, 95(3), 139–149. [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(99\)00030-1](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(99)00030-1)
- Liu, T., Li, R., Zhong, X., Jiang, M., Jin, X., Zhou, P., ... Guo, W. (2018). Estimates of rice lodging using indices derived from UAV visible and thermal infrared images. *Agricultural and Forest Meteorology*, 252, 144–154.
- Matese, A., Baraldi, R., Berton, A., Cesaraccio, C., Di Gennaro, S. F., Duce, P., ... Zaldei, A. (2018). Estimation of Water Stress in Grapevines Using Proximal and Remote Sensing Methods. *Remote Sensing*, 10(1), 114.
- Matese, A., & Di Gennaro, S. (2018). Practical Applications of a Multisensor UAV Platform Based on Multispectral, Thermal and RGB High Resolution Images in Precision Viticulture. *Agriculture*, 8(7), 116.
- Pádua, L., Vanko, J., Hruška, J., Adão, T., Sousa, J. J., Peres, E., & Morais, R. (2017). UAS, sensors, and data processing in agroforestry: a review towards practical applications. *International Journal of Remote Sensing*, 38(8–10), 2349–2391.
- Quebrajo, L., Perez-Ruiz, M., Pérez-Urrestarazu, L., Martínez, G., & Egea, G. (2018). Linking thermal imaging and soil remote sensing to enhance irrigation management of sugar beet. *Biosystems Engineering*, 165, 77–87.
- Romano, G., Zia, S., Spreer, W., Sanchez, C., Cairns, J., Araus, J. L., & Müller, J. (2011). Use of thermography for high throughput phenotyping of tropical maize adaptation in water stress. *Computers and Electronics in Agriculture*, 79(1), 67–74.
- Schmidhuber, J., & Tubiello, F. N. (2007). Global food security under climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104(50), 19703–19708.
- Sullivan, D. G., Fulton, J. P., Shaw, J. N., & Bland, G. (2007). Evaluating the sensitivity of an unmanned thermal infrared aerial system to detect water stress in a cotton canopy. *Transactions of the ASABE*, 50(6), 1963–1969.
- United Nations. (2015). Transforming our world: The 2030 agenda for sustainable development. Resolution adopted by the General Assembly.