

Deteção automática de vinha e extração de parâmetros individuais das plantas por imagem aérea de alta resolução

Luís PÁDUA¹, Telmo ADÃO^{1,2}, Jonáš HRUŠKA¹, Pedro MARQUES¹, José SOUSA¹, 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; jonash@utad.pt; pedro.marques@utad.pt; jmsousa@utad.pt; eperes@utad.pt; jjsousa@utad.pt)

Palavras-chave: Veículos aéreos não tripulados, processamento fotogramétrico, vitis vinifera, processamento digital de imagem, modelos digitais de elevação, índices de vegetação.

Resumo:

A qualidade e o desenvolvimento da videira estão relacionados com a heterogeneidade espacial, que depende de vários fatores, associados diretamente à vinha, com impacto direto na produção e na respetiva qualidade. Esses parâmetros podem levar à ocorrência de problemas fitossanitários que, dependendo da severidade, podem resultar numa diminuição significativa da produção, originando perdas económicas significativas. O recente desenvolvimento tecnológico veio permitir, aos agricultores e aos vitivinicultores, a melhoria do processo de tomada de decisão. Os veículos aéreos não tripulados são capazes de adquirir dados georreferenciados com elevada resolução espacial, utilizando diferentes tipos de sensores, que possibilitam a obtenção de diversos produtos. No entanto, uma parcela é ocupada por vários objetos para além das videiras. As técnicas de processamento digital de imagem surgem como uma metodologia viável para a deteção automática das áreas da parcela ocupada pelas videiras. Neste estudo é apresentado um método para a segmentação automática de videiras e para a obtenção de parâmetros de vinha, através da combinação de modelos digitais de elevação com índices de vegetação. De entre estes parâmetros, destacam-se a área de videira, o volume do copado, o vigor vegetativo e a altura das plantas. Este tipo de análise é fundamental, auxiliando de forma significativa o processo de tomada de decisão na vitivinicultura.

1. Introdução

A busca permanente pela otimização de recursos com vista a minimizar os riscos e os impactos ambientais trouxe para o primeiro plano da discussão a agricultura de precisão (AP). Tendo por objetivo conhecer a variabilidade espacial e temporal da unidade produtiva, as ferramentas e as tecnologias de AP permitem adquirir e tratar grandes volumes de informação que serão, posteriormente, tratados recorrendo, entre outros, a técnicas de processamento de imagem e a métodos geoestatísticos (Zarco-Tejada *et al.* 2014). Analogamente, surgiu o conceito de viticultura de precisão, em que os conceitos da AP são aplicados à vinha e à produção de vinho. A qualidade e o desenvolvimento da videira estão relacionados com a heterogeneidade espacial, que depende de vários fatores, associados diretamente à vinha, para determinar a produção e a respetiva qualidade (Proffitt *et al.* 2006). De entre esses fatores, destacam-se a qualidade e o tipo de solo, as operações de gestão da vegetação, a irrigação, o estado nutricional, o controlo de pragas e de doenças e as variáveis externas, como a temperatura do ar e os níveis de precipitação (Matese *et al.* 2015). Esses fatores podem levar à ocorrência de problemas bióticos e abióticos que, dependendo de sua severidade, podem resultar numa diminuição significativa da produção e, conseqüentemente, em perdas económicas importantes (Baofeng *et al.*, 2016).

O recente desenvolvimento tecnológico veio permitir, aos agricultores e vitivinicultores, a melhoria do processo de tomada de decisão. Assim, as plataformas de deteção remota podem auxiliar a uma melhor compreensão da variabilidade do terreno e podem ser aplicadas na gestão da vinha (Zarco-Tejada *et al.* 2014). Na área da vitivinicultura, estas plataformas já foram utilizadas para, entre outros, estimar o índice de área foliar (Kalisperakis *et al.* 2015; Mathews & Jensen, 2013), na gestão de irrigação e no mapeamento de stress hídrico (Baluja *et al.*, 2012; Bellvert *et al.* 2013), na deteção e no mapeamento de doenças (Albetis *et al.*, 2017; Matese *et al.*, 2013) e na deteção de deficiências nutricionais (Martín *et al.* 2015).

Os veículos aéreos não tripulados (VANT) são capazes de adquirir dados georreferenciados com elevada resolução espacial, utilizando diferentes tipos de sensores (RGB, infravermelho próximo, multi e hiper-espetrais, térmicos e lidar), que possibilitam a obtenção de diversos produtos como mosaicos orto-retificados, modelos digitais de elevação (MDE) e, por combinação de bandas espetrais, índices de vegetação (Pádua *et al.*, 2017a).

Contudo, apesar do elevado volume de dados gerados pelo processamento fotogramétrico de imagens obtidas por VANT, a sua interpretação é, normalmente, difícil para o utilizador final. No caso da vinha, a área de interesse resume-se às videiras (*Vitis vinifera* L.), vegetação que ocupa a área dos bardos. No entanto, a imagem de uma parcela tem grande parte da sua área ocupada por outros objetos para além das videiras, destacando-se a vegetação entre bardos, a vegetação de grande porte que, normalmente, envolve a área de interesse, e as sombras produzidas pelas videiras (Burgos *et al.* 2015; Matese *et al.* 2015). Desta forma, a aplicação de métodos de processamento digital de imagem surge como uma alternativa aos métodos tradicionais para a identificação de videiras. Com esse propósito, vários métodos, foram propostos por diversos autores, tendo por base as imagens adquiridas por VANT ou os produtos delas derivados através de processamento fotogramétrico para segmentação de vinhas: através de técnicas de processamento digital de imagem (Comba *et al.* 2015; Nolan *et al.* 2015), recorrendo a métodos de *machine learning* supervisionados e não supervisionados (Poblete-Echeverría *et al.* 2017), utilizando nuvens de pontos derivadas de processamento fotogramétrico (Weiss & Baret, 2017); e recorreram à utilização de MDE (Baofeng *et al.*, 2016; Burgos *et al.*, 2015; Kalisperakis *et al.*, 2015).

Nesta comunicação, é apresentado um estudo onde se propõe a utilização de um método automático para a segmentação da vinha, permitindo a deteção dos bardos presentes numa determinada parcela, através da combinação de MDE com índices de vegetação. A deteção individual de bardos permite, em seguida, a extração individual de parâmetros relativos a cada videira, como o volume, a altura e o vigor vegetativo.

2. Materiais e métodos

2.1 Caracterização da área estudada

Neste estudo foi utilizada uma parcela da vinha da Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro (41°17'12.0"N; 7°44'15.2"W), composta por uma coleção de castas nacionais recomendadas. A parcela estudada, apresentada na Figura 1, tem uma área de aproximadamente 3350 m², uma separação entre bardos de 2.1 m e entre videiras de 1.2 m. As videiras estão enxertadas

verticalmente, em cordão Guyot bilateral, um dos sistemas mais utilizados na região demarcada do douro (Fraga & Santos, 2017).



Figura 1 – Visão geral da parcela de vinha analisada neste estudo.

2.2 Descrição do sistema e da aquisição de dados

A aquisição das imagens aéreas de alta resolução utilizadas neste estudo foi realizada através do VANT DJI Phantom 4 (DJI, Shenzhen, China), um multicóptero, composto por quatro rotores e com um custo relativamente acessível. A grande flexibilidade do VANT e a sua capacidade para realizar voos manuais ou totalmente automáticos, suportando diferentes configurações, através de uma área posteriormente definida pelo operador de voo, faz dele uma excelente escolha para muitas aplicações. O DJI Phantom 4 possui um sensor CMOS, para aquisição de imagens RGB, com 12.4 MP de resolução acoplado a um *gimbal* eletrônico para estabilização de imagem na rotação em torno dos três eixos principais. O VANT foi, alterado para transportar o sensor Parrot SEQUOIA (Parrot S.A., Paris, França). Trata-se de um sensor constituído por uma matriz de quatro câmaras para aquisição de informação multiespectral em diferentes partes do espectro eletromagnético, nomeadamente, desde a região visível até à região do infravermelho-próximo (*near infrared* – NIR), permitindo, desta forma, a aquisição de informação em diferentes bandas: verde, vermelho, *red-edge* e infravermelho-próximo. Este possui também, um sensor de medição da radiação solar para calibração radiométrica das imagens multiespectrais, estando posicionado acima do VANT. Para além da matriz de câmaras para aquisição de imagens de banda individual, o sensor possui, também, uma câmara RGB com 16 MP, que não foi utilizada neste estudo, pois a câmara RGB nativa do VANT apresentou um melhor comportamento.

A aquisição de dados foi realizada em dois períodos, separados por cerca de 3 semanas (5 e a 24 de julho de 2018). Para a aquisição de dados RGB, os voos foram planeados recorrendo a uma tipologia de grelha-dupla e foi usada uma inclinação de 75° para a câmara. No caso da recolha da informação multiespectral, recorreu-se a um plano de voo com grelha simples, através da aplicação DroneDeploy (DroneDeploy, São Francisco, Estados Unidos da América). Em ambos os casos, a sobreposição longitudinal entre as imagens recolhidas foi de 80%, a sobreposição lateral foi de 70% e a altura de voo foi definida para 40 m, em relação ao ponto de descolagem do VANT. As imagens foram adquiridas entre as 12 e 14 horas TUC, para reduzir as sombras causadas pelo copado das videiras.

2.3 Processamento fotogramétrico

O processamento fotogramétrico foi realizado recorrendo ao *software* Pix4Dmapper Pro (Pix4D SA, Lausanne, Suíça). As imagens georreferenciadas, em conjunto com os parâmetros internos e externos do sensor de aquisição utilizado, permitem a resolução de distorções das imagens e encontrar características comuns (*tie points*) entre as imagens georreferenciadas gerando

uma nuvem de pontos esparsa. Posteriormente, o número de pontos é incrementado, formando-se uma nuvem de pontos densa. A última fase da *pipeline* deste *software* consiste na criação dos resultados orto retificados, através da interpolação da nuvem de pontos em conjunto com as imagens fornecidas inicialmente.

No caso concreto deste estudo, todos os resultados do processamento fotogramétrico foram definidos para possuírem uma resolução espacial de 5 cm. As imagens RGB e multiespectrais de cada voo foram processadas em projetos separados, contudo, para garantir o alinhamento entre os diferentes grupos, foram utilizados pontos de controlo. A nuvem de pontos densa foi gerada com uma alta densidade de pontos e interpolada automaticamente através de um algoritmo baseado no inverso da potência das distâncias, sendo obtidos modelos digitais de superfície, modelos digitais de terreno e mosaicos. Além destes resultados, nos dados multiespectrais, foi ainda gerado o índice de vegetação de diferença normalizada (*Normalized Difference Vegetation Index* - NDVI) (Rouse *et al.* 1974), onde a subtração da banda de vermelho à banda de infravermelho próximo é dividida pela soma das duas, obtendo-se, assim, valores compreendidos entre -1 e 1, estando a vegetação representada com valores superiores a 0. Através deste índice é, então, possível inferir o vigor vegetativo, o índice de área foliar e a disponibilidade de água no solo e potencial de produção. Foi ainda gerado um modelo de altura do copado (*crop surface model* – MAC), através da subtração do MDT ao MDS.

2.4 Extração automática de parâmetros da vinha

Apesar de os dados gerados por processamento fotogramétrico já possuírem a informação sobre a vinha, esta ainda não está segmentada, dificultando a interpretação das imagens, pois mais informação, para além de videiras, está presente nas imagens, como vegetação rasteira, solo e sombras (Pádua *et al.*, 2017b). Assim sendo, é necessário proceder-se à segmentação da vinha, para destacar a vegetação pertencente apenas às videiras. Neste sentido, os diferentes produtos gerados pelo processamento fotogramétrico foram submetidos a vários algoritmos de processamento digital de imagem, para extração automática de diferentes parâmetros da vinha. O método utilizado neste estudo encontra-se publicado em (Pádua *et al.*, 2018) e foi desenvolvido para tirar maior partido dos resultados obtidos pelo processamento fotogramétrico de imagens RGB, adquiridas por VANT. O método proposto por Pádua *et al.* (2018) assenta nas premissas que a vinha se organiza em bardos retos, e que as videiras têm alturas compreendidas em determinados limiares. Desta forma, o método é capaz de detetar toda a vegetação presente na parcela, filtrando-a de acordo com uma determinada altura mínima e máxima. Na Figura 2, apresentam-se parte dos dados que foram utilizados como *input* neste estudo, resultantes do processamento fotogramétrico.

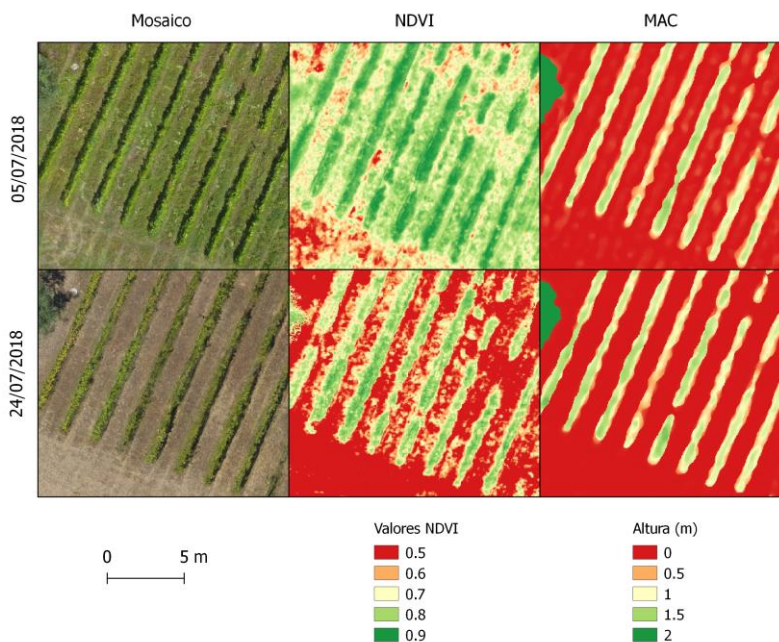


Figura 2 – Detalhe dos dados orto-retificados utilizados, resultantes do processamento fotogramétrico em ambas as datas de voo. Representação em falsa cor dos valores de NDVI e do MAC e apresentação dos mosaicos RGB.

Como parâmetros finais, o método é capaz de fornecer a vegetação pertencente a videiras, outro tipo de vegetação, a posição e o número de bardos, presentes na parcela, e zonas que potencialmente possam ter videiras em falta. Os resultados obtidos, através da aplicação do método, fornecem uma visão global do estado da vinha, contudo, é necessário encontrar formas de entrar em detalhe, estimando-se a posição individual das plantas.

Tendo em conta a capacidade do método para estimar a posição dos bardos (Pádua *et al.*, 2018), esta máscara foi utilizada para determinar a posição individual de cada videira no terreno. Considerou-se, ainda, a equidistância entre videiras. Assim sendo, a máscara dos bardos foi dividida em segmentos de reta equidistantes e em seguida uma zona elipsoidal em torno do centro de cada segmento de reta, o que possibilitou a extração de diferentes parâmetros para cada videira, nomeadamente: a sua altura, o valor de NDVI e o volume. A altura é estimada, através da média dos valores do MAC, dentro de cada elipse. Da mesma forma, é estimado o valor de NDVI, recorrendo à imagem gerada com este tipo de índice proveniente do processamento fotogramétrico das imagens multiespectrais. Relativamente ao volume de cada videira, este foi estimado através da área útil de vegetação de videira dentro de cada elipse, multiplicada pela altura máxima de cada zona, como estimado em (De Castro *et al.*, 2018). As regiões onde não foram estimadas plantas de vinha são descartadas.

3. Resultados e discussão

A aplicação do método à área de estudo, com 1018 pés de videira (média de 31 por bardo), resultou na deteção de 1095 videiras (média de 33 por bardo). Este excesso, de 77 pés de videiras detetadas, deve-se ao facto de, zonas em que não existe qualquer pé de videira, serem preenchidas pelas videiras vizinhas, dificultando, desta forma a deteção totalmente automática (Pádua *et al.*, 2018). Relativamente ao número de videiras estimadas por cada bardo, este valor foi validado através da comparação do número de videiras presentes por bardo, obtendo-se um coeficiente de determinação (R^2) de 0.89 e um erro quadrático médio de ± 4 plantas por bardo.

Quanto aos restantes resultados obtidos pelo método, estes são apresentados nas Figuras 3, 4 e 5. Durante o espaçamento temporal entre as duas datas de aquisição de dados foram realizadas várias operações de gestão de vinha, nomeadamente o enrolamento de vides soltas e alguma poda para melhorar a circulação de ar em torno dos cachos de uvas. Adicionalmente, realizou-se o corte de vegetação entre os bardos, operação claramente visível pela observação da Figura 2. Em relação às condições ambientais, registou-se pouca precipitação no período compreendido entre as duas datas, tendo-se também registado um aumento da temperatura do ar, contrastando com o que sucedeu antes da realização do primeiro levantamento aéreo. Esta caracterização ajudará na interpretação dos resultados obtidos. Assim sendo, foi observado um declínio do valor de NDVI por planta (Figura 3). Nos resultados obtidos com os dados relativos a 5 de julho de 2018, verificou-se um valor de NDVI mais elevado na zona superior direita da parcela em análise, contabilizando-se um total de 366 videiras (cerca de 33%) com um elevado valor de NDVI (maior que 0.8). O número de videiras com baixo valor de NDVI foi relativamente reduzido, sendo que apenas 12 videiras (1%) apresentavam valores inferiores a 0.6, contrastando com as 720 videiras (aproximadamente 66%) com valores de NDVI compreendidos entre 0.6 e 0.8. Analisando os valores de NDVI obtidos a partir dos dados adquiridos no dia 24 de julho de 2018, verificou-se uma grande alteração (degradação) nos valores de NDVI: apenas 11 plantas mantiveram valores de NDVI superiores a 0.8 (-95%), 32 plantas apresentavam, agora, um valor de NDVI inferior a 0.6 (+170%) e as restantes plantas (1049) apresentavam valores de NDVI nas classes (0.6 a 0.7), com 273 plantas, e (0.7 a 0.8), com 776 videiras.

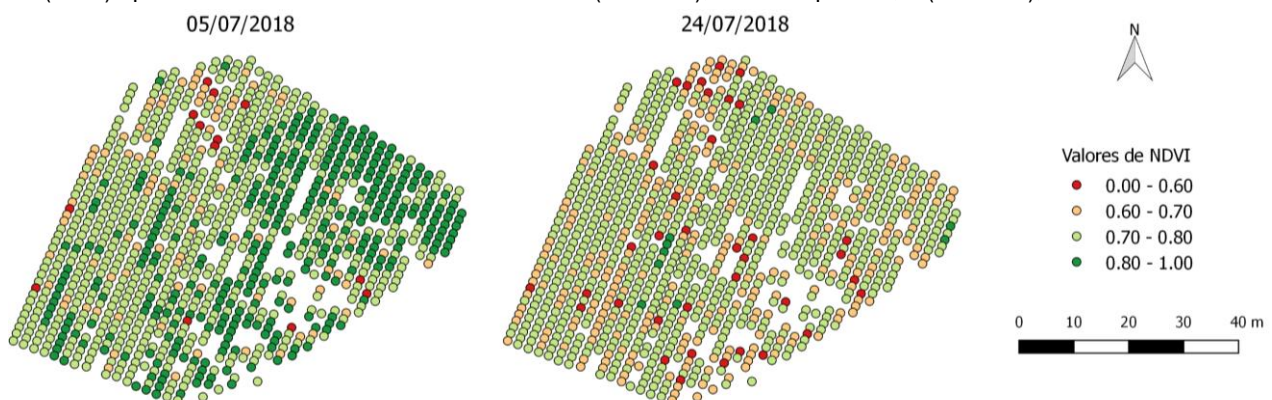


Figura 3 – Valores de NDVI para cada videira nas duas épocas em estudo

Quanto aos valores de altura máxima, estimada para cada planta, estes mantiveram-se relativamente constantes entre as duas datas de voo. Contudo, e como se pode observar na Figura 4, denota-se um ligeiro declínio deste valor, em algumas plantas, considerando o MAC de 24 de julho de 2018, relativamente ao MAC obtido pelo voo de dia 5 de julho, existindo 23 plantas com uma altura máxima inferior a 0.5 m. Estes resultados podem significar a existência de potenciais problemas fitossanitários. Já o aumento de valores de altura máxima, deverá estar relacionado com as operações de gestão do copado das videiras, realizadas entre as duas datas de aquisição voo.

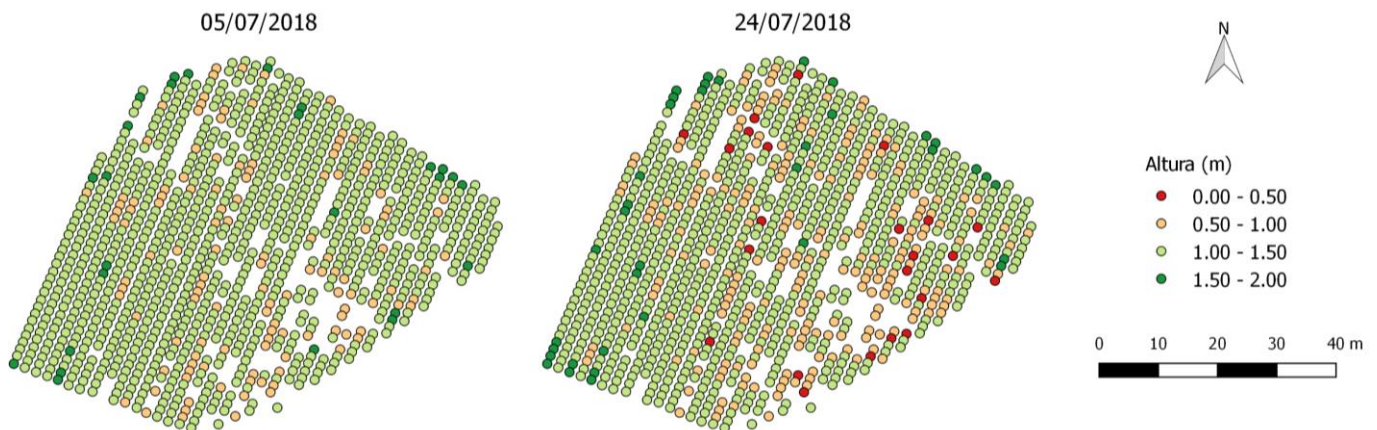


Figura 4 – Altura máxima detetada para cada videira nas duas épocas em estudo

Quanto ao volume estimado para cada videira, os valores registados não ultrapassaram 1.5 m^3 , sendo este expectável, tendo em consideração que o tipo de videiras, da parcela analisada, possui uma altura relativamente baixa (entre 1.4 m a 1.7 m de altura) e que a largura média do bardo é de cerca de 0.5 m, com e um espaçamento de 1.2 m entre videiras. Como esperado, o volume obtido, através dos dados do primeiro voo foi de 925 m^3 , tendo existido um decréscimo de 70 m^3 (-7.5%) em relação ao volume total obtido pelos dados do segundo voo. O valor estimado por videira é apresentado na Figura 5. Observando-se os resultados obtidos na primeira aquisição de dados, 700 videiras foram classificadas com um volume superior a 1 m^3 , existindo, apenas, uma videira com volume inferior a 0.5 m^3 . Já os dados de 24 de julho demonstram um decréscimo do número de videiras com volume superior a 1 m^3 , sendo este de apenas 85, tendo aumentando, consideravelmente, o número de videiras com volume inferior a 0.5 m^3 (90).

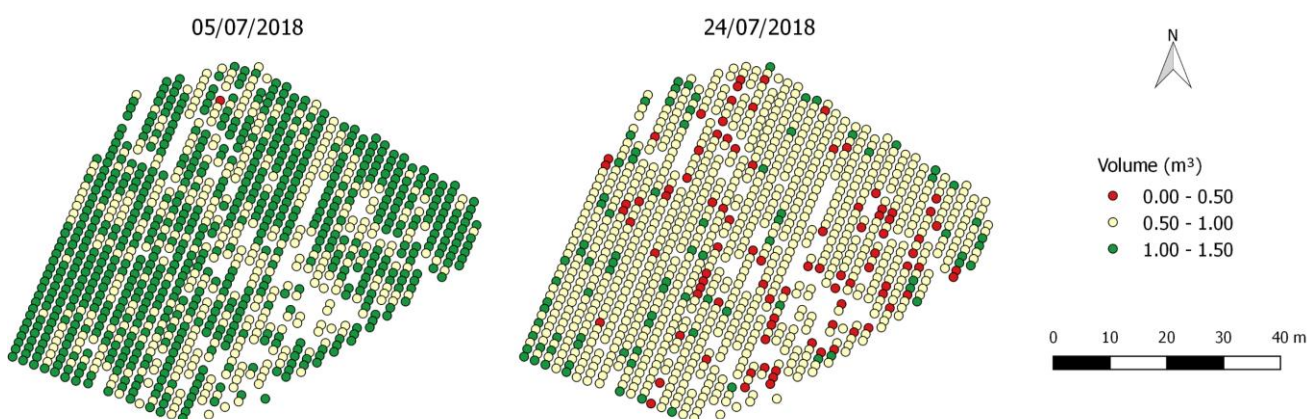


Figura 5 – Volume estimado para cada videira nas duas épocas em estudo

De forma geral, os resultados obtidos permitem ter uma noção clara do estado da vinha, servindo de suporte à tomada de decisão de potenciais operações a aplicar na vinha e, ao mesmo tempo, auxiliando a monitorização da mesma. Os métodos utilizados para a obtenção automática de parâmetros da vinha permitiram verificar diferenças entre os dois momentos de análise, demonstrando, assim, que os dados recolhidos por VANT constituem um método eficaz e bastante flexível de obtenção de parâmetros da vinha.

4. Conclusões e trabalho futuro

Nesta comunicação apresenta-se o tratamento dos produtos obtidos pelo processamento fotogramétrico de dados RGB e multiespectrais, adquiridos por VANT, no contexto da vinha. Apresenta-se, também, uma análise daqueles parâmetros ao nível da planta, recorrendo-se a técnicas de processamento digital de imagem. Conclui-se que o número de plantas estimadas, de forma automática, é ligeiramente superior ao observado no terreno. Este desvio deve-se ao facto de as zonas sem videiras serem ocupadas pela vegetação das videiras adjacentes, dificultando a deteção automática. Os resultados demonstram que é possível observar variações ao longo do tempo, apresentando-se, desta forma, uma alternativa para o acompanhamento de séries temporais de dados obtidos por VANT no contexto da vinha. Podem, ainda, ser explorados outros sensores para a obtenção de outras fontes de dados, como o caso de imagens híper-espectrais e térmicas, desde que estes estejam georreferenciados. Com dados híper-espectrais seria possível a obtenção de assinaturas espectrais por planta, podendo levar à identificação de possíveis problemas de origem biótica ou abiótica. Já os dados térmicos permitiriam a aferição de *stress* hídrico nas videiras, através do cálculo de índices para o efeito. A automatização de extração dos parâmetros da vinha, apresentada neste estudo, pode ser utilizada para treino de sistemas de *machine learning* para avaliação da condição fitossanitária da vinha.

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

- Albetis, J., Duthoit, S., Guttler, F., Jacquin, A., Goulard, M., Poilvé, H., ... Dedieu, G. (2017). Detection of Flavescence dorée Grapevine Disease Using Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Multispectral Imagery. *Remote Sensing*, 9(4), 308.
- Baluja, J., Diago, M. P., Balda, P., Zorer, R., Meggio, F., Morales, F., & Tardaguila, J. (2012). Assessment of vineyard water status variability by thermal and multispectral imagery using an unmanned aerial vehicle (UAV). *Irrigation Science*, 30(6), 511–522.
- Baofeng, S., Jinru, X., Chunyu, X., Yulin, F., Yuyang, S., & Fuentes, S. (2016). Digital surface model applied to unmanned aerial vehicle based photogrammetry to assess potential biotic or abiotic effects on grapevine canopies. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 9(6), 119.
- 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.
- Burgos, S., Mota, M., Noll, D., & Cannelle, B. (2015). Use of very high-resolution airborne images to analyse 3D canopy architecture of a vineyard. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 40(3), 399.
- Comba, L., Gay, P., Primicerio, J., & Ricauda Aimonino, D. (2015). Vineyard detection from unmanned aerial systems images. *Computers and Electronics in Agriculture*, 114, 78–87.
- de Castro, A. I., Jiménez-Brenes, F. M., Torres-Sánchez, J., Peña, J. M., Borra-Serrano, I., & López-Granados, F. (2018). 3-D Characterization of Vineyards Using a Novel UAV Imagery-Based OBIA Procedure for Precision Viticulture Applications. *Remote Sensing*, 10(4), 584.
- Fraga, H., & Santos, J. A. (2017). Daily prediction of seasonal grapevine production in the Douro wine region based on favourable meteorological conditions. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 23(2), 296–304.
- Kalisperakis, I., Stentoumis, C., Grammatikopoulos, L., & Karantzalos, K. (2015). Leaf area index estimation in vineyards from UAV hyperspectral data, 2D image mosaics and 3D canopy surface models. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 40(1), 299.

- Martín, P., Zarco-Tejada, P. J., González, M. R., & Berjón, A. (2015). Using hyperspectral remote sensing to map grape quality in «Tempranillo» vineyards affected by iron deficiency chlorosis. *VITIS - Journal of Grapevine Research*, 46(1), 7.
- Matese, A., Primicerio, J., Di Gennaro, F., Fiorillo, E., Vaccari, F. P., & Genesio, L. (2013). Development and Application of an Autonomous and Flexible Unmanned Aerial Vehicle for Precision Viticulture. *Acta Horticulturae*, (978), 63–69.
- Matese, Alessandro, Toscano, P., Di Gennaro, S. F., Genesio, L., Vaccari, F. P., Primicerio, J., ... Gioli, B. (2015). Intercomparison of UAV, Aircraft and Satellite Remote Sensing Platforms for Precision Viticulture. *Remote Sensing*, 7(3), 2971–2990.
- Mathews, A. J., & Jensen, J. L. R. (2013). Visualizing and Quantifying Vineyard Canopy LAI Using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Collected High Density Structure from Motion Point Cloud. *Remote Sensing*, 5(5), 2164–2183.
- Nolan, A., Park, S., Fuentes, S., Ryu, D., & Chung, H. (2015). Automated detection and segmentation of vine rows using high resolution UAS imagery in a commercial vineyard (Vol. 29, pp. 1406–1412). Apresentado na Proceedings of the 21st International Congress on Modelling and Simulation, Gold Coast, Australia.
- Pádua, L., Marques, P., Hruška, J., Adão, T., Bessa, J., Sousa, A., ... Sousa, J. J. (2018). Vineyard properties extraction combining UAS-based RGB imagery with elevation data. *International Journal of Remote Sensing*, 1–25.
- Pádua, L., Vanko, J., Hruška, J., Adão, T., Sousa, J. J., Peres, E., & Morais, R. (2017a). UAS, sensors, and data processing in agroforestry: a review towards practical applications. *International Journal of Remote Sensing*, 38(8–10), 2349–2391.
- Pádua, L., Adão, T., Hruška, J., Sousa, J. J., Peres, E., Morais, R., & Sousa, A. (2017b). Very high resolution aerial data to support multi-temporal precision agriculture information management. *Procedia Computer Science*, 121, 407–414.
- Poblete-Echeverría, C., Olmedo, G. F., Ingram, B., & Bardeen, M. (2017). Detection and Segmentation of Vine Canopy in Ultra-High Spatial Resolution RGB Imagery Obtained from Unmanned Aerial Vehicle (UAV): A Case Study in a Commercial Vineyard. *Remote Sensing*, 9(3), 268.
- Proffitt, A. P. B., Bramley, R., Lamb, D., & Winter, E. (2006). *Precision viticulture: a new era in vineyard management and wine production*. Ashford, Australia: Winetitles.
- Rouse, J. W., Jr., Haas, R. H., Schell, J. A., & Deering, D. W. (1974). *Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS*. NASA Special Publication, 351, 309.
- Weiss, M., & Baret, F. (2017). Using 3D Point Clouds Derived from UAV RGB Imagery to Describe Vineyard 3D Macro-Structure. *Remote Sensing*, 9(2), 111.
- Zarco-Tejada, P. J., Hubbard, N., & Loudjani, P. (2014). *Precision Agriculture: An Opportunity for EU Farmers - Potential Support with the CAP 2014-2020 (Technical Report)*. Brussels, Belgium: Joint Research Centre (JRC) of the European Commission Monitoring Agriculture ResourceS (MARS).