

Aplicación de tecnologías no invasivas en viticultura de precisión

M.P. Diago* y J. Tardáguila.

Instituto de Ciencias de la Vid y del Vino (Univ. de La Rioja, CSIC, Gobierno de La Rioja).
C/Madre de Dios, 51. 26006, Logroño *E-mail: mpaz.diago.santamaria@gmail.com

Resumen

Una viticultura moderna y sostenible requiere una monitorización objetiva y continua del viñedo para una toma racional de decisiones, y eso sólo es posible aplicando nuevas tecnologías en el viñedo. En este trabajo se presenta una revisión de los últimos avances en la monitorización próxima del viñedo mediante diferentes tecnologías no invasivas como el análisis de imagen RGB e hiperespectral, termografía, sensores basados en la fluorescencia y la espectroscopía NIR (infrarrojo cercano). En el ámbito del análisis de imagen se han desarrollado aplicaciones basadas en diversos algoritmos de clasificación de imágenes para la detección y cuantificación de diferentes parámetros de interés tanto a nivel de cepa, como a nivel de racimo. La visión hiperespectral es una potente técnica espectroscópica capaz de caracterizar el estado fisiológico y/o metabólico de las plantas. Así, se ha conseguido discriminar e identificar variedades y clones de vid a partir de imágenes hiperespectrales de hojas. La termografía infrarroja ha sido propuesta en numerosos estudios como una metodología capaz de caracterizar el estado hídrico del viñedo así como de ayudar a la planificación del riego. Los últimos trabajos han clarificado aspectos metodológicos, sugiriendo las horas centrales del día y el lado menos expuesto de la pared vegetativa de la cepa como las condiciones más adecuadas para la adquisición de imágenes térmicas en viñedo. En los últimos años se han desarrollado tecnologías no invasivas como la fluorescencia de la clorofila y el infrarrojo cercano (NIR) para determinar la composición de la uva directamente en el viñedo. Sensores portátiles de fluorescencia de clorofila han permitido determinar el contenido en antocianos de la uva e inferir el color del vino final. Asimismo, el uso de sensores NIR portátiles, no destructivos, ha permitido determinar la concentración de azúcares en condiciones de pleno campo. En conclusión, existe un amplio abanico de nuevas tecnologías no invasivas, cuya aplicación para monitorizar el viñedo ha arrojado resultados objetivos, robustos y fiables, facilitando la toma de decisiones en viticultura.

Palabras clave: sensores próximos, análisis de imagen, termografía, fluorescencia de clorofila, NIR.

INTRODUCCIÓN

En una situación globalizada y extremadamente competitiva como en la que se encuentra la vitivinicultura actual, es necesario desarrollar conceptos y estrategias que conduzcan a una gestión más eficiente de los recursos, bajo un amplio abanico de condiciones de cultivo y producción, en aras de mantener la sostenibilidad. Los recientes avances en las tecnologías de la información y las comunicaciones (TICs) y la electrónica han permitido el desarrollo de nuevos sensores para monitorizar el ambiente, el suelo y los cultivos agrícolas como ha sido explicado por Lee et al. (2010) en un trabajo de revisión, donde se describen las enormes posibilidades de estas nuevas tecnologías para

monitorizar los cultivos y para cuantificar parámetros tan importantes en agricultura como el rendimiento productivo, el desarrollo foliar, la incidencia de enfermedades y/o la detección de diferentes factores de estrés (hídrico, nutricional, etc.).

El concepto de sensores próximos engloba toda tecnología que implique la obtención de información de un objeto cuando la distancia entre el sensor y el objeto es comparable o inferior a alguna de las dimensiones del sensor. El carácter no invasivo implica la ausencia de daño o modificación del material vegetal analizado. Entre los principales sensores terrestres no invasivos de detección avanzada utilizados para la monitorización del cultivo y/o de la composición de los frutos se encuentran los siguientes: cámaras RGB, cámaras termográficas, cámaras multi e hiperespectrales, sensores basados en la fluorescencia y espectroscopía NIR (infrarrojo cercano). Toda esta información puede obtenerse de forma georreferenciada, con lo que podría utilizarse para determinar la variabilidad espacial del viñedo, en el marco de la viticultura de precisión. En este trabajo se presenta una revisión de los últimos avances en la monitorización próxima del viñedo mediante diferentes tecnologías no invasivas.

ANÁLISIS DE IMAGEN: RGB E HIPERESPECTRAL

Imágenes RGB

La mayoría de las aplicaciones de la visión artificial o el análisis de imagen tiene lugar en interiores, debido a la importancia de la estandarización de la iluminación y a las dificultades que entraña la utilización de estos equipos en pleno campo. En los últimos años algunos autores han comenzado a utilizar metodologías basadas en el análisis de imágenes RGB, con diversos algoritmos de clasificación de imágenes, para la detección y cuantificación de diferentes parámetros de interés a nivel de planta, tales como la superficie foliar expuesta, la porosidad del *canopy*, el número de racimos expuestos y la proporción de hojas dañadas o senescentes (Diago et al., 2012). La estimación del rendimiento es un aspecto crucial en viticultura, que ha sido abordado mediante análisis de imágenes RGB tomadas en campo de inflorescencias (Diago et al. 2014a) y de la zona productiva (Dunn y Martin, 2004; Nuske et al., 2011; Grossetête et al., 2012). Por otro lado, Diago et al. (2014b) han desarrollado una metodología automática a partir de imágenes capturadas en laboratorio de racimos de 7 variedades distintas, capaz de estimar el peso del racimo con un R^2 de 65-97%, el número de bayas por racimo y el peso de baya con un $R^2 = 84\%$ (Figura 1).

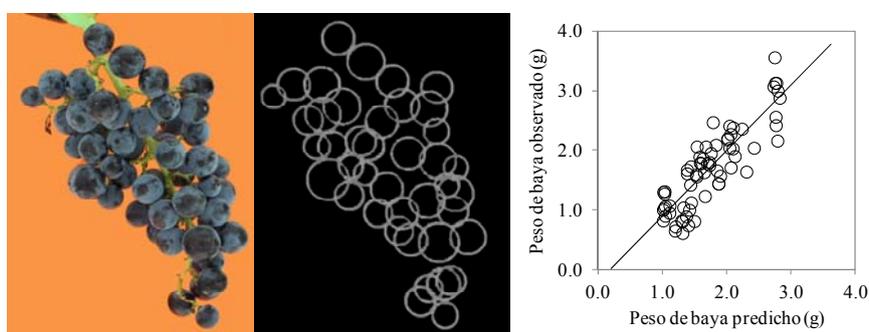


Figura 1. Identificación de las bayas del racimo mediante análisis de imagen RGB y correlación entre peso de baya observado y predicho a partir de análisis de imagen, utilizando un conjunto de imágenes de 7 variedades ($n=70$), ($R^2=0,84$; $p<0,05$).

Asimismo, otros autores han empleado el análisis de imagen en la detección del pedúnculo del racimo (Cubero et al. 2014) y en la estimación de la compacidad del racimo y los principales parámetros estructurales que la configuran (Cubero et al., en prensa).

Imágenes hiperespectrales

La visión hiperespectral es una potente técnica espectroscópica que mide cientos de estrechas longitudes de onda en posiciones espaciales, generando datacubos o hipercubos, que contienen las dos dimensiones espaciales y la dimensión espectral, esto es, un espectro para cada píxel. En el caso de la vegetación, su espectro presenta diferentes regiones de longitud de onda, relacionadas con su contenido hídrico (1300-2500 nm), estructura celular (700-1300 nm) o contenido en pigmentos (350-700 nm). De forma análoga al RGB, el uso de la visión hiperespectral se ha centrado mayoritariamente en aplicaciones interiores, debido principalmente a la importancia de la estandarización de la iluminación. A nivel terrestre, el uso de la visión hiperespectral en viticultura no ha sido prácticamente explorado y con excepción de las aplicaciones de teledetección, los trabajos realizados han capturado las imágenes hiperespectrales en laboratorio. Así, Fernandes et al. (2011) fueron capaces de estimar el contenido en antocianos en hollejos de bayas de Cabernet Sauvignon con un R^2 de 0,65 utilizando redes neuronales. Por otro lado Diago et al. (2013a) desarrollaron una metodología para discriminar variedades de vid con una fiabilidad superior al 92% a partir de imágenes hiperespectrales de hoja tomadas en laboratorio y la técnica de mínimos cuadrados parciales. Siguiendo una metodología similar, Fernandes et al. (2014) han conseguido clasificar hojas de 4 clones de Cabernet Sauvignon diferentes a partir de imágenes hiperespectrales de hojas, con un porcentaje correcto de clasificación entre el 97,8 y el 100%.

TERMOGRAFÍA

El conocimiento del estado hídrico del viñedo de cara a establecer estrategias de riego para hacer frente a la demanda evapotranspirativa de la vid es un aspecto de vital importancia, ya que la disponibilidad hídrica es un factor determinante de la producción y la calidad de la uva (Chaves et al., 2007). La termografía es una técnica de visión, rápida y no invasiva, que permite la visualización de diferencias en la temperatura de la superficie de las hojas, a partir de la radiación infrarroja emitida. Cuando los estomas están abiertos, la planta transpira y la temperatura de la hoja desciende, mientras que tras el cierre estomático la temperatura foliar aumenta (Costa et al., 2010). De este modo, la temperatura de la hoja puede considerarse un indicador de la conductancia estomática y por ende, del estrés hídrico de la planta (Jones et al., 2002). Son numerosos los trabajos llevados a cabo en los últimos años para caracterizar el estado hídrico de la vid y ayudar a establecer estrategias de riego en el viñedo (Jones y Leinonen, 2003; Grant et al., 2007). Sin embargo, importantes aspectos metodológicos referentes tanto a la captura de imágenes como al tratamiento de las mismas han sido más recientemente desentrañados. Así, Pou et al. (2014) concluyeron que las zonas centrales del día y el lado menos expuesto de la espaldera constituían las condiciones idóneas para la adquisición de imágenes térmicas. Asimismo, estimaron la emisividad de la baya, que resultó ser 0,96. Respecto al análisis de las imágenes térmicas, tradicionalmente se han determinado los valores de temperatura de hojas o puntos de vegetación determinados de forma supervisada. Sin embargo Ochagavía et al. (2011) compararon la fiabilidad de las correlaciones entre la conductancia estomática y el potencial hídrico con la temperatura y

los índices térmicos CWSI e I_g , obtenidos de imágenes térmicas, que fueron analizadas señalando varios puntos u hojas de la imagen y estableciendo una región de interés (ROI) de una superficie fija e igual para todas las imágenes (Figura 2).

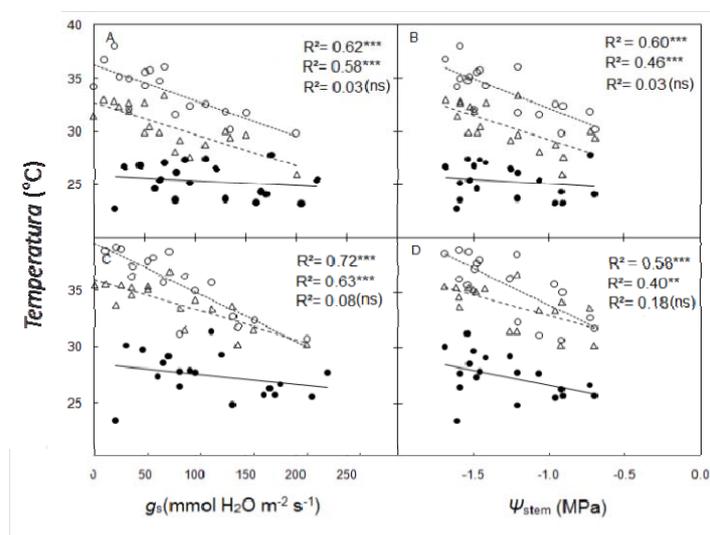


Figura 2. Correlaciones entre la temperatura de la pared vegetativa calculada a partir de hojas seleccionadas en la imagen (C y D) o mediante la definición de una ROI (A y B), con la conductancia estomática (g_s) y el potencial hídrico (Ψ_{stem}). Imágenes térmicas de la parte lateral de la cepa tomadas por la tarde (PM) (○), por la mañana (AM) (●), y de la parte superior o cenital de la cepa tomadas por la tarde (PM) (△).

Las correlaciones fueron comparables siguiendo ambos métodos de tratamiento de imágenes. En el mismo estudio, se compararon también las correlaciones obtenidas a partir de imágenes térmicas tomadas lateralmente de la pared vegetal frente a imágenes térmicas cenitales, capturadas desde la parte superior de la vegetación. Se observó que ambas opciones eran válidas, confirmando la viabilidad de la termografía aérea del viñedo (Baluja et al., 2012a) aunque las temperaturas obtenidas de termogramas cenitales eran consistentemente inferiores a las de termogramas laterales (Figura 2).

Por otro lado, Fuentes et al. (2012) desarrollaron un procedimiento automatizado para el análisis de imágenes térmicas definiendo una ROI, lo que incrementa notablemente la rapidez en la obtención de resultados.

SENSORES BASADOS EN LA FLUORESCENCIA DE LA CLOROFILA

La fluorescencia emitida por varios compuestos presentes en las hojas y los frutos (principalmente clorofila) ha sido utilizada en la última década para monitorizar y estimar la composición fenólica de forma no invasiva (Agati et al., 2007). En este sentido, el Multiplex™ es un sensor comercial portátil multiparamétrico basado en la fluorescencia de la clorofila que se ha utilizado para determinar de forma rápida y no destructiva el contenido en antocianos y otros compuestos fenólicos en bayas de uva (Cerovic et al., 2008; Ben Ghazlen et al., 2010). En el ámbito de la viticultura de precisión, el Multiplex™ ha permitido el estudio de la variabilidad espacio temporal del contenido en antocianos en baya (Figura 3) a lo largo del proceso de maduración (entre envero y vendimia) y entre tres años consecutivos en un viñedo de *Vitis vinifera* L. cv. Tempranillo (Baluja et al., 2012b; 2012c; 2013).

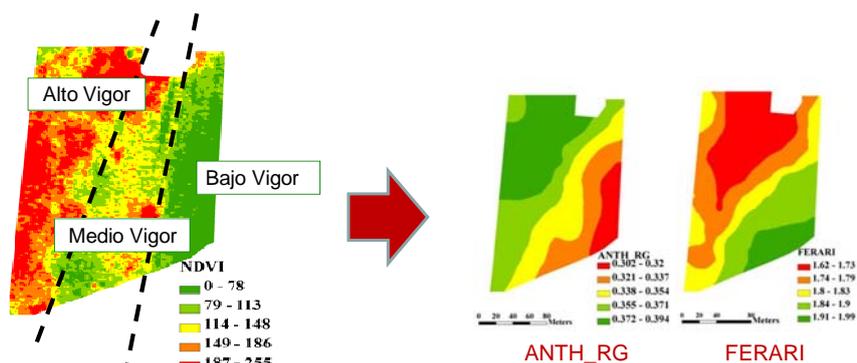


Figura 3. Segmentación de un viñedo en distintas zonas de vigor y su relación con la distribución espacial del contenido en antocianos, estimada mediante los índices ANTH_RG y FERARI, medidos con el sensor Multiplex™.

Asimismo, acoplado a un GPS diferencial, este sensor permite obtener mapas en continuo de información relevante de la cepa, tales como la porosidad de la pared vegetal, el contenido en nitrógeno y clorofila en las hojas, así como los antocianos en uva (datos no publicados). Otro estudio reciente (Diago et al. 2013b) ha demostrado la capacidad del Multiplex™ para caracterizar el contenido en antocianos en uva en el viñedo y predecir el color final del vino elaborado con valores de R^2 entre 0,51 y 0,82, así como el contenido total en polifenoles con R^2 entre 0,44 y 0,87, en las variedades Graciano y Tempranillo.

ESPECTROSCOPIA DE INFRARROJO CERCANO (NIR)

La espectroscopía de infrarrojo cercano (NIR) es un método no destructivo que ha sido ampliamente utilizado para caracterizar la composición de numerosos productos agrícolas. En los últimos años se han desarrollado sensores NIR portátiles que han posibilitado la medición en pleno campo. Así, diversos autores han caracterizado el grado de madurez de la uva, principalmente azúcares y sólidos solubles utilizando sensores portátiles NIR (Barnaba et al., 2014) y técnicas quimiométricas sobre los espectros medidos. Otros aspectos metodológicos, como el tamaño de la población a muestrear, la influencia de la pruina en la medida, o los diferentes pre-tratamientos a las señales obtenidas antes de utilizar los espectros, han sido también recientemente abordados (Urraca et al., sin publicar). La región NIR del espectro electromagnético (730-2300 nm) contiene algunas longitudes de onda que responden a la presencia de agua y al estado hídrico de las muestras. Siguiendo esta premisa, De Bei et al. (2011) desarrollaron un método no destructivo para estimar el potencial hídrico en cepas de Shiraz a partir de medidas NIR con un valor de $r=0,92$. Recientemente Cozzolino (2014) ha publicado una extensa revisión sobre el uso de la espectroscopía NIR en condiciones de campo para el fenotipado de diferentes propiedades de plantas.

CONCLUSIONES

El notable avance de tecnologías de la información y las comunicaciones (TICs) y la electrónica ha permitido el desarrollo de nuevos sensores no destructivos capaces de evaluar el estado fisiológico, agronómico y cualitativo del viñedo de forma precisa, rápida y fiable. Toda esta información es susceptible de ser georreferenciada, y poder así generar

una valiosa caracterización de la variabilidad del viñedo, en el ámbito de la viticultura de precisión, para establecer estrategias de optimización del manejo del mismo.

Agradecimientos

Los trabajos de investigación reseñados han contado con la financiación del proyecto nacional AGL 2011-23673, del Ministerio de Economía y Competitividad, así como del proyecto europeo KBBE-Innovine y de la empresa Force-A (Orsay, Francia).

Referencias

- Agati, G., Meyer, S., Matteini, P., Cerovic, Z.G. (2007). Assessment of anthocyanins in grape (*Vitis vinifera* L.) berries using a non-invasive chlorophyll fluorescence method. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 55, 1053-1061.
- Baluja, J., Diago, M.P., Balda, P., Zorer, R., Meggio, F., Morales, F., Tardáguila, J. (2012a) Assessment of vineyard water status variability by thermal and multispectral imagery using and unmanned aerial vehicle (UAV). *Irrigation Science*, 30, 511-522.
- Baluja, J., Diago, M.P., Goovaerts, P., Tardáguila, J. (2012b) Assessment of the spatial variability of the content of anthocyanins in grapes using a fluorescence sensor: Relationships with vine vigour and yield. *Precision Agriculture*, 13, 457-472.
- Baluja, J., Diago, M.P., Goovaerts, P., Tardáguila, J. (2012c) Spatio-temporal dynamics of grape anthocyanin accumulation in a Tempranillo vineyard monitored by proximal sensing. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 18, 173-182.
- Baluja, J., Tardaguila, J., Ayestarán, B., Diago, M.P. (2013) Spatial variability of grape composition in a Tempranillo (*Vitis vinifera* L.) vineyard over a 3-year survey. *Precision Agriculture*, 40, 40-58.
- Barnaba, F. E., Bellincontro, A., Mencarelli, F. (2014) Portable NIR-AOTF spectroscopy combined with winery FTIR spectroscopy for an easy, rapid, in-field monitoring of Sangiovese grape quality. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 94, 1071-1077.
- Ben Ghazlen, N., Cerovic, Z.G., Germain, C., Toutain, S., Latouche, G. (2010) Non-invasive optical monitoring of grape maturation by proximal sensing. *Sensors* 10 (11), 10040-10068.
- Cerovic, Z.G., Moise, N., Agati, G., Latouche, G., Ben Ghazlen, N., Meyer, S. (2008). New portable optical sensors for the assessment of winegrape phenolic maturity based on berry fluorescence. *Journal of Food Composition and Analysis*, 21, 650-654.
- Chaves, M.M., Santos, T.P., Souza, C.R., Ortuño, M.F., Rodrigues, M.L., Lopes, C.M., Maroco, J.P., Pereira, J.S., (2007). Deficit irrigation in grapevine improves water-use efficiency while controlling vigour and production quality. *Annals of Applied Biology*, 150, 237-252.
- Costa, J.M., Grant, O.M., Chaves, M.M., (2010). Use of thermal imaging in viticulture: current application and future prospects. In 'Methodologies and results in grapevine research'. (Eds S Delrot, H Medrano, E Or, L Bavaresco, S Grando) pp. 135-50. (Springer: Dordrecht, The Netherlands).
- Cozzolino, D. (2014) Use of infrared spectroscopy for in-field measurement and phenotyping of plant properties: Instrumentation, data analysis, and examples. *Applied Spectroscopy Reviews*, 49, 564-584.
- Cubero, S., Diago, M.P., Blasco, J., Tardáguila, J., Millán, B., Aleixos, N. (2014) A new method for pedicel/peduncle detection and size assessment of grapevine berries and other fruits by image analysis. *Biosystems Engineering*, 117, 62-72.
- Cubero, S., Diago, M.P., Blasco, J., Tardáguila, J., Prats-Montalbán, J. M., Ibañez, J., Tello, J., Aleixos, N. (2014) A new method for bunch compactness assessment using automated image analysis. *Australian Journal of Grape and Wine Research* (en prensa).
- De Bei, R., Cozzolino, D., Sullivan, W., Cynkar, W., Fuentes, S., Damberg, R., Pech, J., Tyerman, S. (2011). Non-destructive measurement of grapevine water potential using near infrared spectroscopy. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 17, 62-71.

- Diago, M.P., Correa, C., Millán, B., Barreiro, P., Valero, C., Tardáguila, J. (2012). Grapevine's yield and leaf area estimation using supervised classification methodology on RGB images taken under field conditions. *Sensors*, 12, 16988-17006.
- Diago, M.P., Fernandes, A.M., Millan, B., Tardaguila, J., Melo-Pinto, P. (2013a) Identification of grapevine varieties using leaf spectroscopy and partial least squares. *Computers and Electronics in Agriculture*, 99, 7-13.
- Diago, M.P., Guadalupe, Z., Baluja, J., Millán, B., Tardáguila, J., (2013b) Appraisal of wine color and phenols from a non-invasive grape berry fluorescence method. *Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin*, 47, 55-64.
- Diago, M.P., Sanz-Garcia, A., Millan, B., Blasco, J., Tardaguila, J. (2014a) Assessment of flower number per inflorescence in grapevine by image analysis under field conditions. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 94, 1981-1987.
- Diago, M.P., Tardaguila, J., Aleixos, N., Millan, B., Prats-Montalban, J.M., Cubero, S., Blasco, J. (2014b) Assessment of cluster yield components by image analysis. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, doi: 10.1002/jsfa.6819.
- Dunn, G. M., Martin, S. R. (2004) Yield prediction from digital image analysis: A technique with potential for vineyard assessments prior to harvest. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 10, 196-198.
- Fernandes, A.M., Melo-Pinto, P., Millan, B., Tardaguila, J., Diago, M.P. (2014) Automatic discrimination of grapevine (*Vitis vinifera* L.) clones using leaves hyperspectral imaging and partial least squares. *The Journal of Agricultural Science* DOI: <http://dx.doi.org/10.1017/S0021859614000252>.
- Fernandes, A.M., Oliveira, P., Moura, J.P., Oliveira, A.A., Falco, V., Correia, M.J., Melo-Pinto, P. (2011) Determination of anthocyanin concentration in whole grape skins using hyperspectral imaging and adaptive boosting neural networks. *Journal of Food Engineering*, 105, 206-216.
- Fuentes, S., De Bei, R., Pech, J., Tyerman, S., (2012). Computational water stress indices obtained from thermal image analysis of grapevine canopies. *Irrigation Science*, 30, 523-536.
- Grant, O.M., Tronina, L., Jones, H.G., Chaves, M.M. (2007). Exploring thermal imaging variables for the detection of stress responses in grapevine under different irrigation regimes. *Journal of Experimental Botany*, 58, 815-825.
- Grossetête, M., Berthoumieu, Y., Da-Costa, J. P., Germain, C. (2012) Early estimation of vineyard yield: site specific counting of berries by using a smartphone, in *International Conference of Agricultural Engineering (CIGR-AgEng2012)*, Ed, Valencia, Spain.
- Jones, H.G., Leinonen, I., (2003). Thermal imaging for the study of plant water relations. *Journal of Agricultural Meteorology* 59, 205-217.
- Jones, H.G., Stoll, M., Santos, T., de Sousa, C., Chaves, M.M., Grant, O.M., (2002). Use of infrared thermography for monitoring stomatal closure in the field: application to the grapevine. *Journal of Experimental Botany*, 53, 2249-2260.
- Lee, W.S., Alchanatis, V., Yang, C., Hirafuji, M., Moshou, D., Li, C. (2010). Sensing technologies for precision specialty crop production. *Computers and Electronics in Agriculture*, 74, 2-33.
- Nuske, S., Achar, S., Bates, T., Narasimhan, S., Singh, S. (2011). Nuske S, Achar S, Bates T, Narasimhan S and Singh S, Yield estimation in vineyards by visual grape detection, in *2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. IEEE, New York, pp. 2352-2358.
- Ochagavía, H., Grant, O.M., Baluja, J., Diago, M.P., Tardáguila, J. (2011) Exploring zenithal and lateral thermography for the assessment of vineyard water status. *Proceedings of 17th International Symposium of GiESCO*. Alba-Asti, Italy.
- Pou, A., Diago, M.P., Medrano, H., Baluja, J., Tardaguila, J. (2014) Validation of thermal indices for water status identification in grapevine. *Agricultural Water Management*, 134, 60-72.