

A-02

USO DE IMÁGENES TÉRMICAS AÉREAS EN REMOLACHA AZUCARERA (*Beta vulgaris*) PARA PROPUESTA DE RIEGO DE PRECISIÓN

Quebrajo Moya, L.¹, Egea, G.², Pérez-Ruiz, M.², Pérez-Urrestarazu, L.²

¹ Técnico apoyo a la Investigación. Departamento Ingeniería Aeroespacial y Mecánica de Fluidos. ETSIA. Universidad de Sevilla. Ctra. Utrera km.1, 41013. Sevilla. E-mail: lquebrajo@us.es.

² Profesor. Departamento Ingeniería Aeroespacial y Mecánica de Fluidos, Área de Ingeniería Agroforestal, ETSIA. Universidad de Sevilla. Ctra. Utrera km.1, 41013. Sevilla. E-mail: gegea@us.es, manulperez@us.es, lperez@us.es

Resumen

Para un manejo adecuado del riego es necesario tener información disponible de una manera rápida y sencilla. Gracias a los avances tecnológicos, esto es posible. En este trabajo se han utilizado imágenes captadas mediante una cámara térmica montada sobre un vehículo aéreo para evaluar el estado hídrico de un cultivo de remolacha azucarera en una parcela con una gran variabilidad espacial en las propiedades del suelo. Los resultados se han comparado con mediciones puntuales de la humedad del suelo. No se ha percibido una relación directa entre el estado hídrico del suelo y del cultivo. Por otro lado, sí se advierte una tendencia decreciente en la producción en relación al estrés hídrico detectado en el cultivo gracias a las imágenes térmicas. Se observan claramente las diferencias entre los distintos tipos de suelo, de modo que queda patente la conveniencia de llevar a cabo estrategias de riego diferenciales en función de la distribución de los mismos, especialmente en parcelas muy heterogéneas.

1.- Introducción y objetivos

El sector agrícola se enfrenta actualmente a cambios radicales en la forma en que se recopila, analiza y utiliza la información para optimizar los procesos productivos. En los últimos años ha crecido el interés por la agricultura de precisión (AP) a nivel de explotación, y será cada vez más común que los agricultores tengan a su disposición terabytes de información sobre cuestiones tan específicas como el tamaño, el peso y el estado de los frutos, producción exacta en cada unidad de superficie o el estado de humedad y el nivel de nutrientes de planta y suelo. Precisamente el gran reto es sacarle partido a toda esa información generada.

Las particularidades de la agricultura de regadío en zonas áridas y semi-áridas ponen de relieve la necesidad de desarrollar técnicas para utilizar los recursos hídricos disponibles de manera muy eficiente, aplicando la cantidad justa de agua a la planta en el momento adecuado. Es por ello por lo que las técnicas de riego de precisión se convierten en una herramienta muy útil para mejorar la eficiencia del uso del agua. Una de las posibilidades que abre el uso de sensores remotos es, precisamente, el manejo adecuado del agua a escala de parcela, pudiendo seguir diferentes estrategias de riego atendiendo a la variabilidad espacial del suelo y al estado de los cultivos. Debido a esa variabilidad, las necesidades hídricas reales de los cultivos pueden cambiar dentro de una misma parcela. En este caso, el reto del riego de precisión consiste en desarrollar metodologías que posibiliten delimitar zonas de manejo uniformes dentro de las parcelas de cultivo y validar

protocolos que permitan una programación precisa del riego en las distintas sub-unidades establecidas.

Igualmente, es muy importante que la obtención de información y análisis de datos se realice en el menor tiempo posible, de manera que se pueda determinar el estado hídrico de las plantas para poder actuar rápidamente sobre ellas. Muchas de las características de la fisiología de las plantas responden directamente a los cambios en el estado hídrico en el tejido de la planta, por lo que pueden ser utilizados como indicadores precisos para la programación del riego (Jones, 2004). Dicho estado se mide comúnmente en términos de potencial hídrico (Jones, 1992), para el cálculo del cual se ha utilizado tradicionalmente la cámara de presión (Scholander et al., 1965). De este modo, el déficit de agua se puede determinar a partir del potencial hídrico de las hojas. Aunque este método es una medida fiable del estado hídrico de la planta, es muy lento y laborioso y requiere un análisis continuado que lo hace poco operativo (Cohen et al., 2005).

Desde hace más de 30 años se acumulan las evidencias sobre el potencial y utilidad que presenta la medida de la temperatura del cultivo para monitorizar el estado hídrico del mismo. Por ello, la medición de la temperatura de la cubierta ha sido propuesta como una alternativa a la medida del potencial hídrico. Cuando se induce el estrés hídrico, los estomas de la hoja se cierran, la tasa de transpiración se reduce y su efecto refrigerativo disminuye, lo cual hace que la temperatura de la hoja se eleve. Idso et al. (1981) y Jackson et al. (1981) propusieron el índice de estrés hídrico del cultivo (Crop Water Stress Index, CWSI) como un indicador de estrés hídrico de la planta. Se ha demostrado que la detección de la temperatura de una cubierta vegetal usando sensores o imágenes infrarrojas puede ser aplicada para el cálculo de CWSI y estimar así el estado hídrico del cultivo para establecer una adecuada programación del riego en multitud de cultivos, como por ejemplo el algodón, el maíz, vid, y los pistachos (González-Dugo et al., 2006; Payero et al., 2006; Moller et al., 2007; Testi et al., 2008). Las imágenes térmicas captadas desde un micro-UAV presentan grandes ventajas frente al uso de termómetros de infrarrojos manuales (mucho trabajo y poca representatividad de las medidas) e imágenes térmicas satelitales (resolución espacial y temporal insuficiente para la mayoría de aplicaciones de riego). Para parcelas de pequeña/mediana extensión, estas plataformas pueden representar también una ventaja competitiva frente a plataformas aéreas de mayores dimensiones/autonomía, como pueden ser los aviones tripulados de gran envergadura portando sensores remotos.

El presente trabajo tiene como objetivo evaluar el uso de imágenes térmicas procedentes de una cámara portada sobre un UAV para conocer el estado hídrico del cultivo con el fin de que puedan utilizarse como herramientas de ayuda a la decisión en la gestión eficiente del riego en remolacha azucarera.

2.- Materiales y métodos

2.1. Parcela experimental

El trabajo se llevó a cabo durante la campaña 2014/2015 en una parcela comercial de remolacha azucarera (*Beta vulgaris* L.) situada en la provincia de Cádiz, y con una alta variabilidad espacial de las propiedades físico-químicas del suelo (36,6965397° N, 6,3184375° W). La variabilidad del suelo se caracterizó por la recogida aleatoria y análisis de muestras de suelo tomadas a distintas profundidades. Este análisis fue realizado en los laboratorios del CITIUS (Universidad de Sevilla) y los parámetros analizados fueron pH, conductividad eléctrica (CE), carbono orgánico oxidable (C orgánico), materia orgánica (MO), capacidad de intercambio catiónico (CIC) y contenido en arcillas, limo y arenas. Se realizó un muestreo sistemático, que consiste en dividir la parcela en zonas manteniendo una distancia fijada entre cada dos puntos muestreados (red o malla). Todas las muestras fueron georreferenciadas por un receptor DGNS (Differential-Global Navigation Satellite System), lo que permitió obtener con la ayuda de un sistema de información geográfica (FarmWorks) los mapas de distribución de las diferentes propiedades del suelo mediante técnica de krigeado.

El mapa de variabilidad del suelo permitió delimitar dentro de la propia parcela una zona de suelo arcilloso y otra de suelo arenoso (Figura 1). En el suelo arcilloso se establecieron dos sub-parcelas y otras dos en el suelo arenoso. Todas las sub-parcelas fueron equipadas con dos tubos de acceso para la monitorización del contenido de humedad del suelo en profundidad (sonda PR-2, Delta-T Devices Ltd., Cambridge, UK). La sonda PR-2 fue calibrada para los suelos de las dos zonas de estudio. Para ello, durante varios días al final del ciclo de cultivo se tomaron muestras de suelo inalteradas en las proximidades de los tubos de acceso. Simultáneamente a la recogida de muestras de suelo, se tomaron lecturas de humedad con la sonda PR-2. Las muestras de suelo se llevaron a laboratorio para determinación de densidad aparente y contenido volumétrico de humedad. Las medidas de humedad realizadas con la sonda PR-2 y las obtenidas en laboratorio se utilizaron para determinar las curvas de calibración para cada tipo de suelo.

Con el objetivo de poder comparar las dinámicas de humedad del suelo en ambas localizaciones, las medidas de humedad en el perfil 0-100 cm del suelo se normalizaron mediante el cálculo de la fracción de agua extraíble relativa (REW):

donde R es el contenido de humedad real y R_{\max} y R_{\min} los contenidos de humedad a capacidad de campo y punto de marchitez, respectivamente, determinados con funciones de pedotransferencia.



Figura 1. Varibilidad del suelo en la parcela. En rojo, zona de textura arenosa; en azul, zona de textura arcillosa; y en amarillo, zona de textura franco arenosa y franco-arcillo arenosa.

2.1. Cámara térmica y plataforma de vuelo (UAV)

Durante la estación de riego y con frecuencia semanal/quincenal se realizaron vuelos con UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*) equipado con cámara termográfica (Tau 2 324, FLIR, Oregon, USA).

El UAV empleado, modelo Phantom 2 (SZ DJI Technology Co., Ltd.), tiene una autonomía de vuelo de 25 minutos y 1.000 metros de alcance de comunicación en espacios abiertos y va equipado con un receptor GNSS. La cámara se instaló con una orientación vertical en la mitad de la parte inferior del UAV, lo que permitió la grabación de imágenes de video y el ajuste de umbrales isotérmicos para colorear zonas de interés térmico partiendo

de imágenes en escala de grises. Los ajustes y calibración de la cámara se realizaron cada día que se hicieron medidas de temperatura en campo. Los principales parámetros usados fueron la emisividad de la superficie de cultivo y la altura de vuelo.

Las imágenes térmicas se tomaron a medio día solar, por presentar ese periodo las condiciones más idóneas para ello (Bellvert et al. 2014), a una altura de 30 m y en días soleados. Posteriormente, se analizaron con un software de segmentación de imágenes escrito en R (R Development Core Team, 2015) que permite discriminar los píxeles correspondientes a vegetación de los píxeles correspondientes a suelo desnudo o mezclado con vegetación así como determinar la temperatura media del dosel vegetal. Para el mosaicado de imágenes, se usó un software específico (Agisoft PhotoScan, Agisoft LLC).

La evaluación del estado hídrico del cultivo se realizó a partir de la diferencia entre la temperatura media de la cubierta vegetal y la temperatura del aire (ΔT). Los valores de ΔT fueron asimismo utilizados para determinar la integral de estrés durante el periodo de medida, para lo que se utilizó una expresión análoga a la propuesta inicialmente por Myers (1988):

donde t es el número de medidas de ΔT , $\Delta T_{i,i+1}$ es la media de ΔT para cualquier intervalo $i, i+1$, $c_{i,i+1}$ es la media del menor valor de ΔT para cualquier periodo $i, i+1$ y n es el número de días en el intervalo. Los valores de c se obtienen a partir de la línea de referencia en condiciones de no estrés (NWSB, de sus siglas en inglés: Non water-stress baseline) utilizada para el cálculo de CWSI (Bellvert et al., 2014):

donde DPV representa el déficit de presión de vapor y a y b son dos parámetros obtenidos de forma empírica para cada especie y para unas condiciones ambientales determinadas. En este trabajo han sido utilizados los valores de a y b determinados por Idso (1982) para remolacha azucarera en días soleados: $a = 2.50$; $b = -1.92$. Los datos de DPV se obtuvieron de una estación agroclimática de la Junta de Andalucía próxima a la parcela de estudio.

2.2. Estrategia de riego

En cada zona de estudio (correspondientes a los dos tipos de suelo estudiados, arcilloso y arenoso) se estableció una sub-parcela en la que se practicó el riego de acuerdo con el criterio del agricultor (siglas WW en adelante) y otra en la que se aplicaron dos periodos de déficit hídrico mediante el cegado de boquillas de los aspersores colindantes (siglas WS en adelante). El primer ciclo de déficit tuvo una duración de 24 días, al cual siguió un ciclo de recuperación de otros 24 días, para terminar con un último ciclo de estrés.

2.3. Datos de producción

Al final del ciclo de cultivo (principios de julio) se llevó a cabo la recolección manual de la remolacha procedente de las cuatro sub-parcelas de estudio. Las muestras recogidas se enviaron al laboratorio para el análisis de rendimiento, contenido de azúcar (t / ha), índice económico para el agricultor valorando los ingresos en remolacha tipo de 16° (IEA, t / ha 16°), pureza (%), etc.

3.- Resultados y discusión

La dinámica de humedad en el suelo para las cuatro sub-parcelas se muestra en la Figura 2. En la misma, se observa que el tratamiento WW de la zona de arena permitió mantener valores de REW próximos a 1 (condiciones de capacidad de campo) durante todo

el periodo de estudio. En cambio, el tratamiento WW de la zona de arcilla no consiguió mantener los valores de REW próximos a la unidad durante la estación de riego, sino que se observó una caída de REW hasta valores próximos a 0.6 durante el período comprendido entre los días 80 y 125 aproximadamente. A pesar de haber recibido la misma programación de riego (dosis y frecuencias), las diferencias existentes en las condiciones de humedad del suelo en arcilla_WW y arena_WW ponen de manifiesto la importancia de adaptar los sistemas de riego a la heterogeneidad del suelo. Las diferencias existentes en velocidad de infiltración del agua, capacidad de retención del suelo e incluso en la estructura del sistema radicular en cada tipo de suelo van a condicionar sobremanera la eficiencia de aplicación del riego.

Tan solo una correcta delimitación de las áreas que requieren un manejo uniforme, acompañado del establecimiento de protocolos basados en la monitorización de variables hídricas como el estado hídrico del suelo y/o del cultivo permitirá garantizar una gestión eficiente del riego.

La dinámica de REW en las sub-parcelas arcilla_WS y arena_WS fue similar a lo largo del periodo de estudio, si bien arcilla_WS siempre mostró un valor de REW 15-20% inferior al observado en arena_WS (Figura 2). La restitución del riego al finalizar el primer ciclo de déficit hídrico en los tratamientos WS no permitió que los valores de humedad del suelo alcanzasen los niveles de los tratamientos WW en ninguna de las zonas de estudio. Este hecho se debe a que el agricultor aplicaba dosis de riego acordes a la evapotranspiración acumulada durante el período entre riegos, claramente insuficiente para recargar las reservas de agua del suelo tras un período de déficit prolongado.

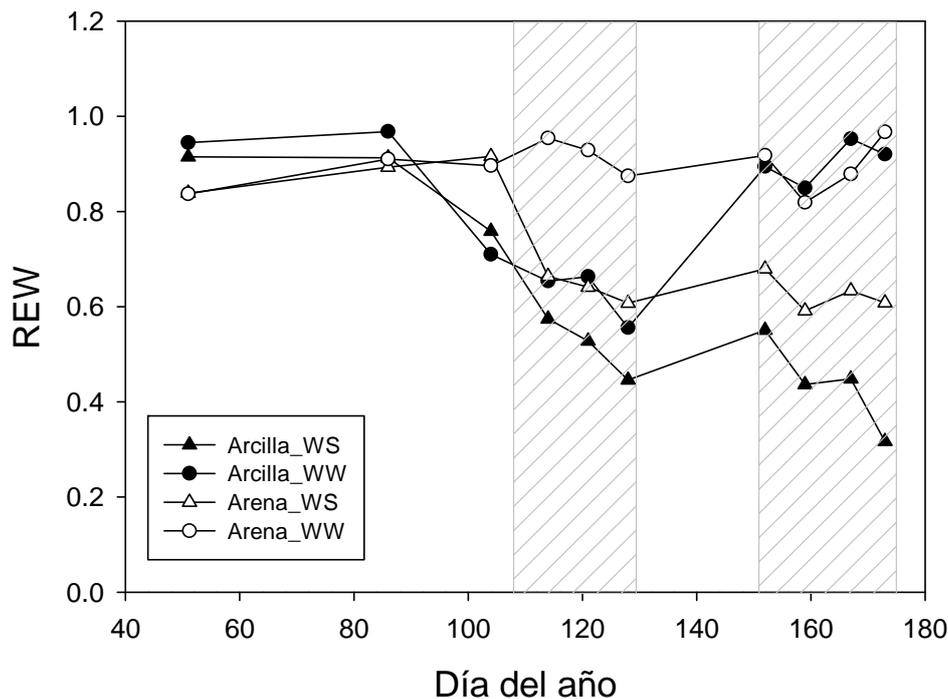


Figura 2. Evolución de la fracción de agua extraíble relativa (REW) en el perfil 0-100 cm para las cuatro zonas de estudio. Cada punto es la media de dos medidas realizadas en sendas localizaciones de cada zona de estudio. El área rayada delimita los períodos en los que se suprimió el riego en las zonas Arcilla_WS y Arena_WS.

En la figura 3 se muestra un ejemplo de 4 imágenes térmicas obtenidas el mismo día y a la misma hora en las 4 sub-parcelas de estudio. A partir de la escala de color, se puede apreciar las grandes diferencias de temperatura existentes entre unas zonas y otras. La captura de imágenes térmicas debe acompañarse de un procesamiento de datos posterior que 'filtre' todos aquellos píxeles que no corresponden al objeto deseado, en este caso el dosel vegetal del cultivo. En la figura 4 se presenta, de igual forma, un ejemplo del proceso de

segmentación de imágenes que debe realizarse para determinar las temperaturas medias del cultivo en una zona determinada.

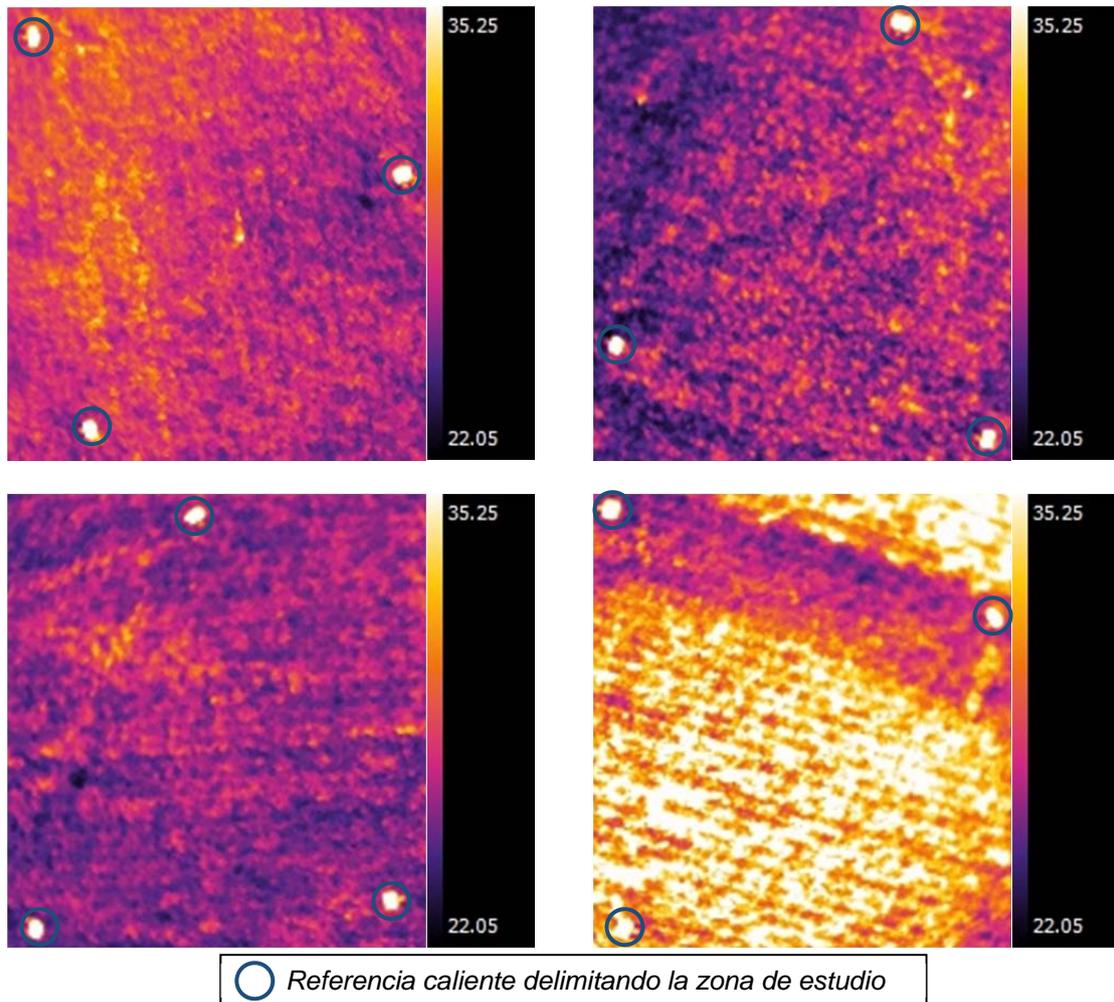


Figura 3. Imágenes térmicas en falso color determinadas desde UAV para las cuatro zonas de estudio el día 08/05/15 a medio día solar. Arcilla WW (arriba izda.); Arcilla WS (arriba dcha.); Arena WW (abajo izda.); Arena WS (abajo dcha.).

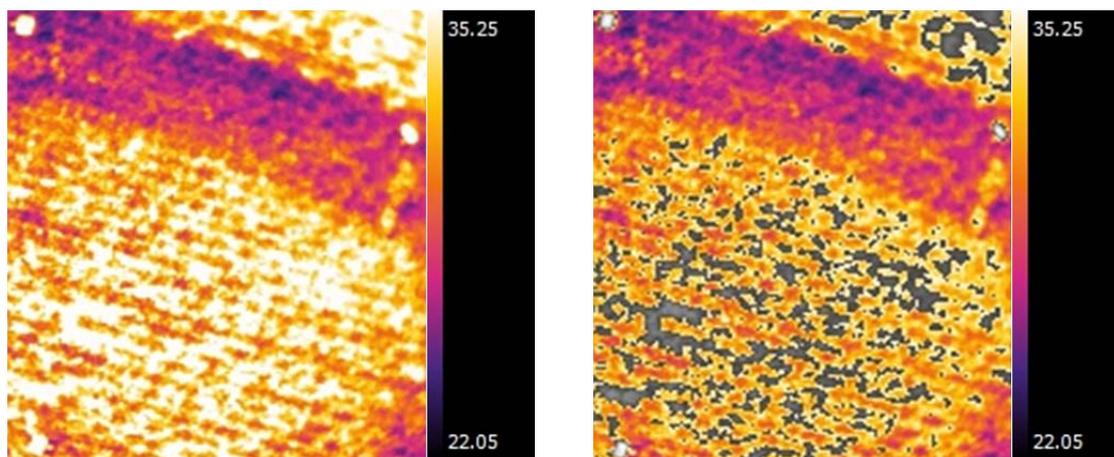


Figura 4. Imagen térmica de zona Arena WS determinada el día 08/05/15 a medio día solar a una altura de vuelo de 30 m. En la imagen de la derecha se observan en color gris los píxeles identificados por el algoritmo de segmentación como suelo desnudo y/o mezcla de suelo desnudo/vegetación.

Una vez realizado el procesado de imágenes térmicas para las cuatro sub-parcelas y todos los días de medida, las diferencias de temperatura cultivo-aire (ΔT) fueron calculadas a lo largo del periodo de estudio y se presentan en la Figura 5. La comparación de la dinámica de ΔT con REW revela que no existe una clara similitud entre las dinámicas del estado hídrico del suelo y del cultivo. El día 86, por ejemplo, no se observaron apenas diferencias en REW, si bien ΔT fue sensiblemente superior en Arcilla_WS con respecto al resto. El día 114, los contenidos de humedad en Arcilla_WS y Arcilla_WW fueron relativamente parecidos (Figura 2), coincidiendo con los valores de ΔT obtenidos (Figura 5). Sin embargo, para el mismo día, los valores de REW en Arena_WS y Arena_WW mostraron una reducción en el contenido de humedad del primero con respecto al segundo, aspecto que no se tradujo en un incremento de ΔT en Arena_WS como se hubiese esperado. Lo que se observó a nivel de cultivo es que, ese día (114), las sub-parcelas de la zona de arena presentaron un estado hídrico del cultivo similar y más favorable que el de las zonas de arcilla. A partir del día 114, el cultivo de la sub-parcela Arena_WS incrementa los valores de ΔT con respecto al resto de sub-parcelas. Atendiendo a la dinámica de REW (Figura 2), dado que Arcilla_WS mostró valores inferiores de REW con respecto a Arena_WS, se habría esperado que ambos tratamientos hubiesen mostrado valores similares de ΔT o, incluso, superiores en Arcilla_WS.

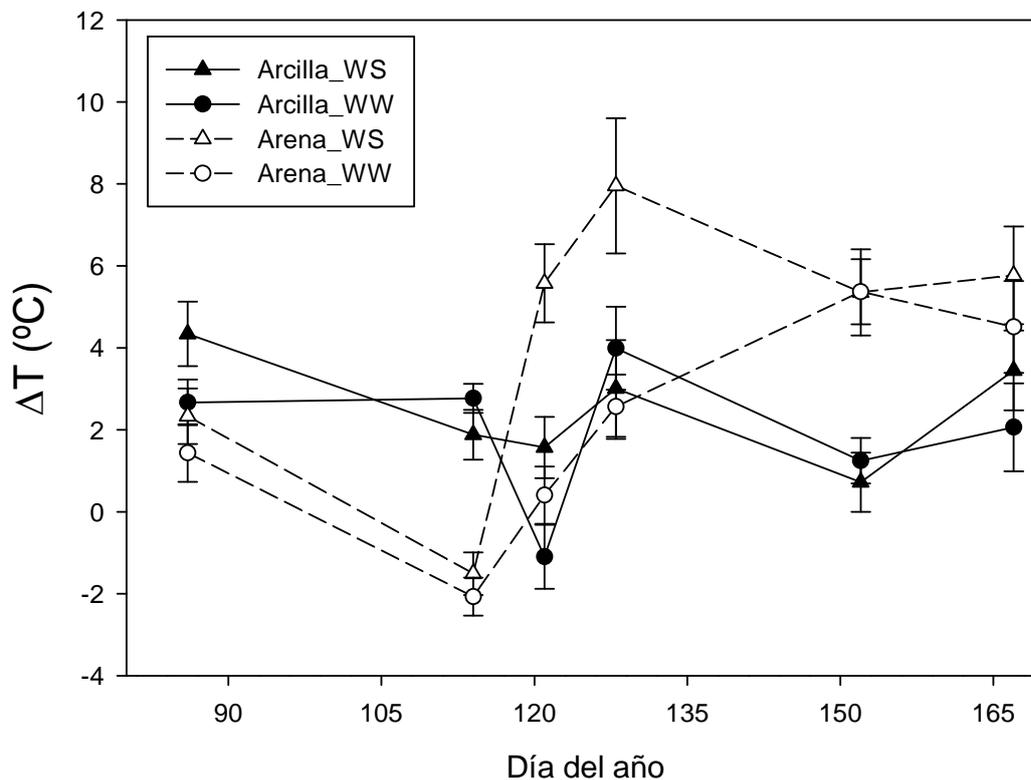


Figura 5. Evolución de la diferencia de temperatura entre la cubierta vegetal determinada con UAV y la temperatura del aire (ΔT) para las cuatro parcelas de estudio. Las barras de error indican el error estándar de la media.

La interpretación de estos resultados arroja dos conclusiones claras. En primer lugar, ΔT determinada a partir de imágenes térmicas tomadas desde un micro-UAV permiten identificar variaciones en el estado hídrico del cultivo debidas a una gestión del riego diferente o a la variabilidad natural de las propiedades físico-químicas del suelo. En segundo lugar, se observa que la dinámica del contenido de humedad del suelo determinada en un número limitado de puntos de muestreo (dos por sub-parcela en este estudio), no permite representar adecuadamente la variación del estado hídrico del cultivo. Las limitaciones de la

monitorización del estado hídrico del suelo como herramienta de ayuda para la gestión del riego ya han sido puestas de manifiesto en muchos trabajos de investigación. Este trabajo añade más evidencias a esta problemática y destaca el potencial de herramientas como la termografía infrarroja que permiten muestrear toda la superficie de cultivo, evitando de esta forma disponer de una información muy sesgada a nivel espacial.

En un intento de integrar el estrés hídrico acumulado por el cultivo en las distintas sub-parcelas para el período de medida, se utilizó la expresión de Myers (1988) originalmente desarrollada para cuantificar la integral de estrés a partir de medidas de potencial hídrico foliar. La relación obtenida entre la integral de estrés hídrico determinado por métodos térmicos ($S_{\Delta T}$) con respecto a la producción total de remolacha y la producción normalizada atendiendo a criterios económicos para el agricultor (IEA) se presenta en la Figura 6. Se puede observar que la producción mostró una tendencia linealmente decreciente con $S_{\Delta T}$, si bien el tratamiento que menor producción mostró a pesar de no ser el que mayor $S_{\Delta T}$ tuvo fue Arcilla_WS. Sin embargo, la IEA obtenida en Arcilla_WS fue similar a la obtenida en las parcelas WW, por lo que la relación IEA vs $S_{\Delta T}$ mostró una tendencia decreciente a partir de un cierto umbral de $S_{\Delta T}$, por encima del cual el indicador IEA no se vio afectado.

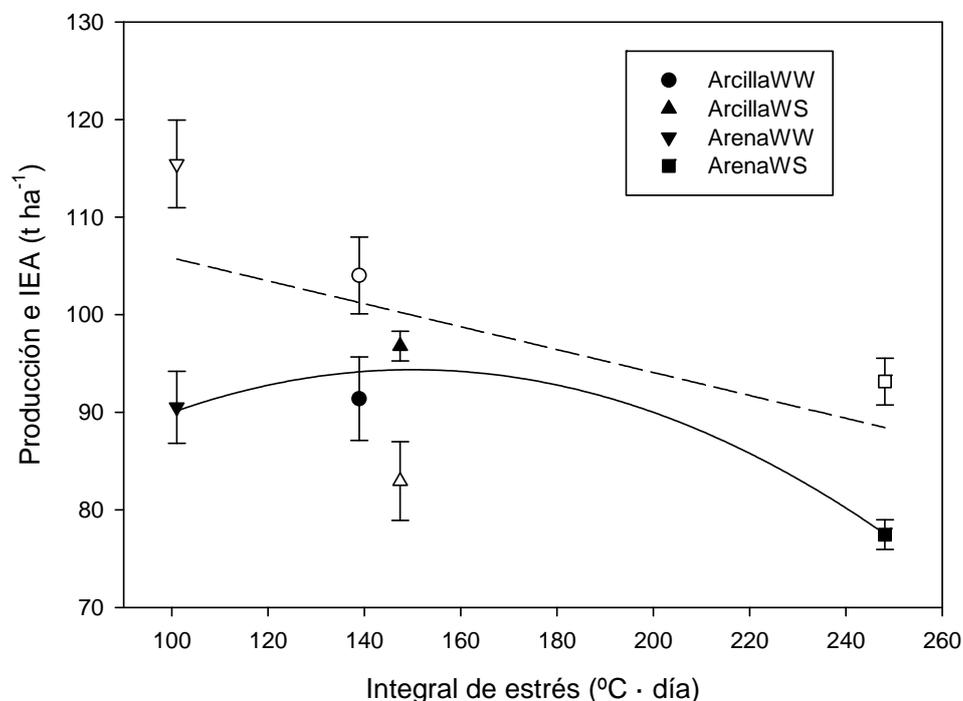


Figura 6. Relación entre la producción (símbolos blancos) e IEA (símbolos negros) con la integral de estrés determinada a partir de la temperatura de cubierta vegetal tal y como se ha descrito en la metodología. Línea discontinua: regresión entre producción e integral de estrés. Línea continua: regresión entre IEA e integral de estrés.

4.- Conclusiones

La medida de la temperatura del cultivo determinada de forma remota mediante UAV ha demostrado ser una medida eficaz para determinar el estado hídrico del cultivo en remolacha azucarera. Asimismo, se observa cómo no existe una relación directa en el tiempo entre el estado hídrico del suelo y del cultivo, por lo que se refuerza la hipótesis de que la medida de la humedad del suelo mediante unos pocos sensores distribuidos por la parcela puede no ser la mejor estrategia, aunque ciertamente ayuda a realizar ajustes en la programación de los riegos, especialmente en parcelas con características del suelo uniformes. Los ensayos realizados han permitido comprobar que las parcelas de remolacha

azucarera con alta heterogeneidad espacial del suelo requieren de un manejo del riego que atienda a las particularidades de cada zona. Tanto las sub-parcelas regadas según el criterio del agricultor como aquellas que fueron deliberadamente sometidas a periodos de déficit hídrico mostraron patrones de respuesta hídrica diferentes en función del tipo de suelo. La producción de remolacha en las zonas con limitación de riego fue inferior a la obtenida en las zonas sin alteración del riego, siendo la reducción más acusada en la zona con textura arenosa.

Estos resultados confirman la necesidad de establecer programas de riego adaptados a la variabilidad espacial del terreno en las parcelas de remolacha altamente heterogéneas, especialmente bajo condiciones de riego deficitarias donde las mermas productivas pueden ser más acusadas en unas zonas que en otras.

5.- Bibliografía

- Bellvert, J., Zarco-Tejada, P.J., Girona, J., Fereres, E. (2014). Mapping crop water stress index in a 'Pinot-noir' vineyard: comparing ground measurements with thermal remote sensing imagery from an unmanned aerial vehicle. *Precision Agric* 15, 361-376.
- Cohen Y, Alchanatis V, Meron M, Saranga Y, Tsipris J (2005) Estimation of leaf water potential by thermal imagery and spatial analysis. *J Exp Bot* 56, 1843-1852.
- Gonzalez-Dugo, M. P., Moran, M. S., Mateos, L., & Bryant, R. (2006). Canopy temperature variability as an indicator of crop water stress severity. *Irrigation Science*, 24, 233–240.
- 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. *Agric Meteorol* 24, 45–55.
- Idso, S.B. (1982). Non-water stressed baselines: a key to measuring and interpreting plant water stress. *Agric Meteorol* 27, 59-70.
- Jackson, R.D., Idso, S.B., Reginato, R.J., Pinter, P.J. (1981). Canopy temperature as a crop water-stress indicator. *Water Resour Res* 17, 1133-1138.
- Jones, H.G. (1992). *Plants and microclimate*, 2nd edn. Cambridge: Cambridge University Press
- Jones, H.G. (2004). Irrigation scheduling: advantages and pitfalls of plant-based methods. *J Exp Bot* 55, 2427-2436.
- Moller, M., Alchanatis, V., Cohen, Y., Meron, M., Tsipris, J., Naor, A., Ostrovsky, V., Sprintsin, M., Cohen, S. (2007). Use of thermal and visible imagery for estimating crop water status of irrigated grapevine. *J Exp Bot* 58, 827-838.
- Myers, B.J. (1988). Water stress integral-a link between short-term stress and long-term growth. *Tree Physiol* 4, 315-323.
- Payero, J.O., Tarkalson, D. e Irmak, S. (2006). Corn yield response to different irrigation depths with subsurface drip irrigation, Annual meeting of the ASCE-EWRI. ASCE-EWRI, Omaha, Nebraska.
- Scholander, P.F., Hammel, H.T., Bradstreet, E.D., Hemmingsen, E.A.. (1965). Sap pressure in vascular plants. *Science* 148, 339-346.
- Testi, L., Goldhamer, D.A., Iniesta, F., Salinas, M. (2008). Crop water stress index is a sensitive water stress indicator in pistachio trees. *Irrig Sci* 26, 395-405.