

Determinación de CWSI en olivares mediante procesamiento de imágenes termográficas

Flavio Capraro*, Facundo Vita Serman**, Santiago Tosetti*

* Instituto de Automática INAUT (UNSJ – CONICET)
Av. Lib. Gral. San Martín 1112 (o), Ciudad Capital, San Juan, ARGENTINA

fcapraro@inaut.unsj.edu.ar ; stosetti@inaut.unsj.edu.ar

** Instituto de Agricultura Sostenible del Oasis IASO (UNDEC)
9 de Julio 22, Chilecito, La Rioja, ARGENTINA

fvitaserman@undec.edu.ar

Resumen. En la expansión de la olivicultura moderna, en Argentina se observa una transformación hacia olivares intensivos y super intensivos. La intensificación lleva a aumentos de rendimiento, sin embargo, la producción de las aceitunas en la provincia de San Juan depende en gran medida del riego. Ello se debe a la alta evapotranspiración (ET₀) anual y la escasez de lluvias, requiriéndose la adecuada programación de las aplicaciones de riego para evitar deficiencias o exceso de agua que afecten a la producción. Una herramienta adecuada para conocer y analizar el estado hídrico de los cultivos es el Índice de Estrés Hídrico del Cultivo (CWSI). El objetivo de este trabajo fue determinar la respuesta del CWSI para diferentes niveles de potencial hídrico (Ψ_h) del olivo. Para analizar la variabilidad del CWSI y el Ψ_h se realizaron siete tratamientos de riego en un olivar intensivo (cv. Arbequina) con riego por goteo. Durante una temporada 2017/2018 se efectuaron aplicaciones del 120% (T₁₂₀), 100% (T₁₀₀), 90% (T₉₀), 80% (T₈₀), 70% (T₇₀), 60% (T₆₀) y 40% (T₄₀) de la evapotranspiración del cultivo estimada (ET_c). En dos días de verano, 27/12/2017 y 16/2/2018, se adquirieron dos conjuntos de imágenes con una cámara termográfica FLIR VueProR 640 y una cámara multispectral MicaSense RedEdge, montadas en un dron que sobrevoló el olivar. A partir de estas imágenes se construyeron mapas termográficos del cultivo (T_c) para luego calcular un mapa de CWSI georreferenciado de alta resolución. Finalmente, los valores promedios de Ψ_h , T_c y CWSI de cada tratamiento fueron correlacionados, concluyéndose que el CWSI es un indicador sensible y adecuado para identificar estrés en el cultivo del olivo. Mayores valores de T_c y CWSI se registraron en los tratamientos de riego deficitario en comparación con plantas bien regadas. A partir de la correlación entre Ψ_h y CWSI se clasificó el mapa de CWSI en cuatro situaciones de estrés hídrico a fin de lograr la rápida y sencilla interpretación del estado hídrico del olivar. La experiencia fue realizada en un cuadro de 9has de olivo, dentro de una explotación comercial ubicada en la localidad de Cañada Honda, situada al sur de la provincia de San Juan, Argentina.

Palabras claves: Riego de Precisión, Estrés Hídrico, Termografía, Agricultura Digital, Olivos.

1 Introducción

En la provincia de San Juan, ubicada en la región de Cuyo al oeste de Argentina, los sistemas agrícolas son altamente dependientes del riego debido a la alta demanda de agua de los cultivos y al reducido aporte de agua de lluvia, las que se concentran en época estival (90 a 110mm anuales) [1]. Para afrontar esta situación, los productores de la región han tecnificado los sistemas de riego, incorporándose a las explotaciones agrícolas equipos de riego presurizado (en su mayoría riego por goteo). Con estos sistemas de riego se logra mejorar la eficiencia en el uso del agua, ya que su aplicación se realiza de manera localizada, acompañado de la adecuada programación del riego que se establece según las necesidades hídricas del cultivo [2].

La tecnificación de los sistemas de riego es altamente necesaria, sin embargo, se ha comprobado que esta acción debe ser complementada con la adecuada gestión, lo que involucra la correcta programación de los turnos y el mantenimiento necesario del sistema. El objetivo de enfatizar la buena gestión radica en evolucionar de un “riego tecnificado” hacia el “riego de precisión” [3]. En este último concepto, la gestión del riego se realiza en base a un proceso dinámico y continuo del análisis de información, el cual involucra de manera integrada datos de: condiciones del clima (evapotranspiración de referencia ETo), requerimientos hídricos del cultivo (coeficientes de cultivo Kc, fenología y cobertura vegetal), estado del suelo (niveles de humedad y nutrientes) y funcionamiento de los equipos de riego (activación de zonas de riego).

En el proceso de gestión de la explotación agrícola, el objetivo de maximizar la homogeneidad y productividad dentro de cada parcela puede verse seriamente afectado por problemas en el manejo del riego [4]. Esto se asocia a aplicaciones erróneas en la cantidad de agua de riego o en momentos inapropiados, originadas por falta de información climática o por el cálculo impreciso de la demanda hídrica del cultivo. Los problemas en la homogeneidad pueden estar asociados a falencias en los diseños de los equipos de riego o daños ocasionados en el sistema de distribución (cañerías rotas, taponamiento de goteros o aspersores, rotura de válvulas, etc.), los cuales suelen ser difíciles de detectar dentro de la parcela.

Para conocer y analizar la uniformidad de la parcela bajo riego, se disponen de herramientas digitales que proporcionan información sobre el estado hídrico y el crecimiento de los cultivos mediante el análisis de imágenes de la zona cultivada. Las herramientas permiten calcular índices del cultivo que se representan en un mapa o mosaico georreferenciado, con el objetivo de analizar la variabilidad espacial en un momento determinado. De contarse con varios registros durante la campaña, también se podrá ampliar el análisis de manera temporal y conocer así la evolución de la parcela. Los índices se calculan a partir de la información contenida en una serie de imágenes termográficas y multiespectrales de alta resolución. Las imágenes pueden obtenerse con cámaras especiales montadas en aviones o drones [5-6], o imágenes de las bandas espectrales registradas con satélites [7].

Los índices de vegetación se determinan por la combinación de las imágenes disponibles. La metodología radica en realzar la cubierta vegetal en función de la respuesta espectral y atenuar la influencia de otros componentes de la imagen como ser el suelo, edificios, objetos, iluminación, etc. [8]. Los índices resultan ser imágenes

que se obtienen del cálculo algebraico y combinaciones entre distintas bandas espectrales. El resultado es una nueva imagen en donde se destacan gráficamente determinados píxeles relacionados con los parámetros de las coberturas vegetales (densidad, área foliar, clorofila, entre otros) [9,10]. Cada índice de vegetación presenta ventajas y limitaciones [11], por lo cual deberá seleccionarse el más adecuado en base a la característica del cultivo que se requiere evaluar. Los índices de vegetación más utilizados son: NDVI (Índice de Vegetación Diferencial Normalizado), EVI (Índice de Vegetación Mejorado), SAVI (Índice de Vegetación Ajustado al Suelo) y su variante optimizada OSAVI, ARVI (Índice de Vegetación Resistente a la Atmósfera), GCI (Índice de Clorofila Verde), PRI (Índice de Reflectancia Fotoquímica), SIPI (Índice de Pigmentación Insensible a la Estructura), entre otros [12].

Uno de los métodos más utilizados para conocer el estado hídrico del cultivo es el Índice de Estrés Hídrico del Cultivo (CWSI; "*Crop Water Stress Index*"), propuesto por Idso et al. [13]. El cálculo de este índice, a diferencia de los índices de vegetación anteriormente mencionados, se determina en base de la medición de la temperatura del cultivo y en las condiciones meteorológicas. La temperatura del dosel vegetal o cobertura del cultivo (T_c) es considerada como un indicador del estado hídrico del de la planta [14]. El cálculo del CWSI requiere conocer la temperatura de la cobertura del cultivo por lo que, en lugar de utilizar la imagen de una banda espectral determinada, se emplea una imagen de temperatura (o termográfica) de la zona cultivada.

Las investigaciones reportadas en [15] y [16] muestran que, para cultivos frutales de estructura leñoso, la T_c y el CWSI presentan alta sensibilidad a las condiciones de estrés hídrico del cultivo; mientras que los demás índices de vegetación presentan niveles de mediana a baja sensibilidad, siendo el PRI el más sensibles de entre éstos [17]. En relación a ello, el uso de T_c y CWSI permitiría identificar zonas con estrés hídrico asociado a problemas de riego, mientras que el uso de otros índices de vegetación permitiría identificar diferencias en el desarrollo del cultivo asociadas a inconvenientes sobre el manejo del mismo, presencia de enfermedades y/o deficiencia en fertilización.

En el presente trabajo se efectúa el cálculo del CWSI en una parcela experimental de cultivo de olivo con riego por goteo. Se aplicaron siete tratamientos de riego diferenciados con el objetivo de analizar la variabilidad del CWSI y, en base a ello, identificar condiciones de estrés hídrico; los cuales pueden simularse a problemas asociados a la programación del riego o por fallas de funcionamiento de los equipos. El trabajo de investigación requirió el abordaje desde los aspectos tecnológicos y agronómicos. Desde el enfoque tecnológico los objetivos consistieron en: registrar diferentes variables en el campo utilizando estaciones de medición automáticas, capturar una serie de imágenes termográficas y multispectrales desde un dron, y diseñar programas informáticos que permitan automatizar el cálculo de los diferentes índices del cultivo, y presentar los valores resultantes en un mapa georreferenciado de alta definición. Desde el enfoque agronómico se realizaron siete tratamientos de riego (un tratamiento testigo, un tratamiento sobre-regado, y los cinco restantes de riego deficitario controlado (RDC) con el objetivo conocer los valores de temperatura y de CWSI para distintas condiciones en el estado hídrico del olivar.

2 Métodos y materiales

2.1 Descripción del sitio experimental

El ensayo a campo se realizó en un olivar comercial de “Arbequina” implantado en el 2004, en un marco de plantación intensivo de 6 x 3 (555 árboles ha⁻¹) (figura 1) y localizado en Cañada Honda (32° 2' 17" S; 68° 32' 10" O; 620 m.s.n.m.), provincia de San Juan, en el noroeste de Argentina. La estructura del olivar se la puede describir como un seto alto, con una altura promedio de los árboles de 4.4 m. El volumen de copa por árbol fue de entre 30-35 m³ y la cobertura de suelo alrededor del 55%. El clima de la región es árido con una precipitación media anual de 190 mm concentrándose en los meses de verano [18]. El suelo del olivar tiene una capa superior franco-arenosa (0–60 cm), luego una capa arenosa (60–90 cm), con grava por debajo de los 90 cm de profundidad. La profundidad máxima exploración del sistema radicular se encontró a 90 cm.

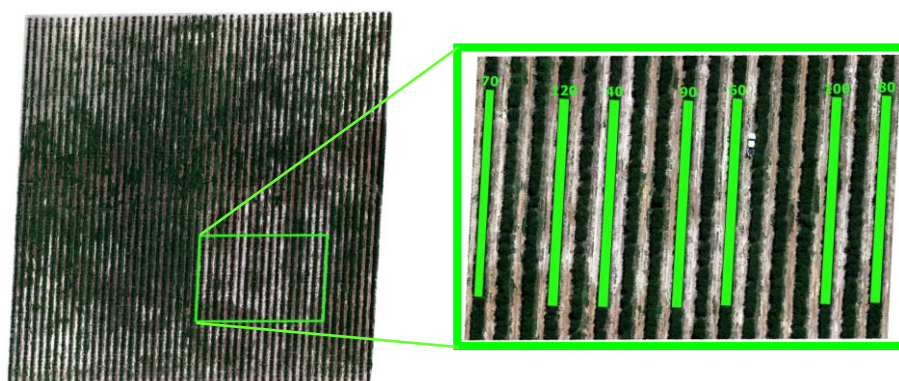


Fig. 1. Imagen aérea del cuadro de olivo con riego por goteo (9 has) y zona seleccionada para el ensayo con siete tratamientos de riego diferenciado.

2.2 Tratamientos de riego y diseño experimental

Se establecieron siete regímenes de riego, con aplicaciones de 120% (T₁₂₀), 100% (T₁₀₀), 90% (T₉₀), 80% (T₈₀), 70% (T₇₀), 60% (T₆₀) y 40% (T₄₀) de la evapotranspiración del cultivo (ET_c). La programación del riego se determinó en base a T₁₀₀ a fin de reponer el 100% de las necesidades hídricas del cultivo durante toda la campaña (septiembre 2017 hasta abril de 2018), como se indica:

$$ET_c [mm] = ET_0 * K_c \quad (1)$$

ET₀ fue calculada con la metodología Penman–Monteith modificada propuesta por FAO [19]. K_c fue el coeficiente de cultivo estacionalmente constante (K_c = 0.55), teniendo en cuenta lo propuesto por [20], considerando que las lluvias invernales son inexistentes en esta región.

Los olivos fueron regados mediante dos líneas de riego por goteo separadas a 2 m, con emisores de 4 l h⁻¹. La distancia de los goteros para T₁₀₀ fue de 1,14 m para lograr una tasa de aplicación de agua (o lámina) de 0.87 mm h⁻¹ h^{a-1}. En el resto de los tratamientos se usaron los mismos emisores, pero cambiando el espaciamiento entre ellos a lo largo de la línea de riego proporcionalmente, a fin de obtener el porcentaje de agua preestablecido para cada tratamiento. El riego se aplicó cada 5 días y la cantidad se determinó en base a lo calculado en (1) para dicho periodo.

Como se observa en la figura 1.b, dentro del olivar comercial se determinó una zona de ensayo. El diseño experimental siguió un diseño fuente-lineal para cultivos extensivos [21] [22]. Este diseño creó un gradiente secuencial en aplicación del riego variable acorde a los tratamientos ya definidos. Dentro de la parcela homogénea se seleccionaron 7 hileras con 24 plantas cada una. Se eligieron veintiocho parcelas experimentales (cuatro parcelas repetidas por tratamiento de riego) que consistían en filas con 6 árboles, los dos árboles centrales fueron utilizados para la toma de datos.

2.3 Mediciones en campo

Durante el trascurso de la campaña se efectuaron de mediciones de potencial hídrico de hoja (Ψ_h) y humedad del suelo. En cercanías del ensayo se instaló una estación agrometeorológica marca Davis, modelo Ventage Pro II (figura 2.a), para registrar las variables climáticas y estimar la ET₀ horaria requerida para determinar la aplicación del riego cada cinco días, mediante (1).

En el centro de T₁₀₀ se instaló una estación de medición de humedad de suelo para monitorizar de forma continua el desarrollo del tratamiento (figura 2.b). La estación cuenta con un registrador de datos que almacena de forma automática las mediciones de: cuatro sensores de humedad de suelo (Decagon EC-5) situados a 30, 60, 90 y 110 cm de profundidad, un sensor de presión insertado en el lateral de riego, y un caudalímetro insertado en la línea de riego para registrar el agua suministrada a la parcela.

Las mediciones efectuadas en la estación meteorológica, en la estación de medición en campo, y en el equipo de riego se registraron cada 10 minutos. El seguimiento en tiempo real se realizó desde la plataforma web “Telemetría Agrícola” [23] (<http://telemetria.inaut.unsj.edu.ar/inicio/>).

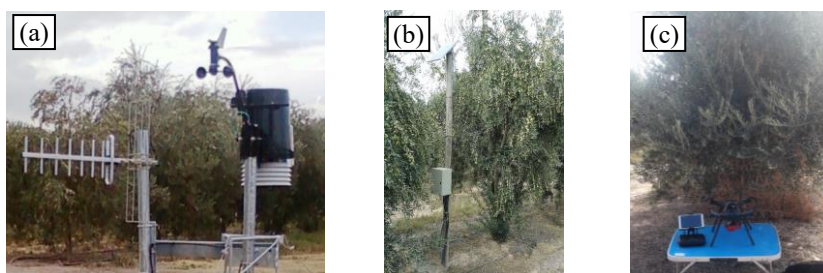


Fig. 2. Equipamiento utilizado. (a) Estación meteorológica automática. (b) Estación de medición de variables en campo. (c) Cuatrirrotor autónomo equipado con una cámara multispectral.

La adquisición de las imágenes de la zona cultivada se realizó con una cámara termográfica Flir VueProR 640 y una cámara multispectral Micasense RedEdge (5 bandas) montadas en un dron modelo Solo, de 3DR Robotics (figura 2.c). Al inicio del vuelo se tomaron imágenes de un panel de calibración (patrón) para ajustar los valores de temperatura y reflectancia en la etapa de procesamiento de imágenes.

2.4 Adquisición de las imágenes y metodología de procesamiento

Se realizó el análisis espacial del olivar en base a la información de imágenes termográficas y multispectrales. Se realizaron dos vuelos para adquirir las imágenes, los días 27/12/2017 y 16/2/2018. Los vuelos se iniciaron a las 13:30 hs (medio día solar), a la altitud de 40 m, velocidad de 5m/seg, y solapamiento de imágenes 80% vertical y 80% horizontal. Los registros de temperatura ambiente (Taire) y la humedad relativa (Hr) durante el primer vuelo: Taire= 29,7 °C; Hr= 36%; mientras que para el segundo: Taire= 33,8 °C; Hr= 37%. En forma simultánea a la toma de las imágenes se realizaron los muestreos y mediciones requeridos en los olivos de cada bloque.

La primera etapa del procesamiento consistió en fusionar las imágenes para lograr un mapa u ortomosaico de los dos conjuntos de imágenes (un set con imágenes termográficas y otro set con imágenes multispectrales). Posteriormente se ajusta la posición y orientación del ortomosaico con puntos de control en tierra (GCP) georeferenciados de manera precisa. Los GPC son marcas o puntos en el terreno con coordenadas geográficas conocidas dentro de la zona fotografiada. Para culminar, se debe realizar el ajuste de los niveles de reflectancia y de temperatura mediante las respectivas curvas de calibración. Este procesamiento se ha realizado con el software Pix4Dmapper, versión 4.4, bajo la licencia de prueba [24]. En la figura 3 se presentan los seis mapas de reflectancia logrados en la zona de estudio para el día 27/12/2017.

Los ortomosaicos resultantes suelen presentar pequeñas diferencias de posición y orientación entre ellos. Por ello, se requiere ajustar la georreferenciación del mapa termográfico para lograr la alineación y coincidencia con las imágenes multispectrales de manera precisa. En el presente trabajo, la imagen termográfica es de menor resolución que las imágenes multispectrales. Para el ajuste se ha utilizado el software QGIS, versión 2.18 [25]; mediante el complemento de Georeferenciación de la herramienta GDAL [26]. Se utilizó de imagen base la fusión de los mapas de las bandas Rojo, Verde y Azul (RGB) de la cámara multispectral (figuras 4.a, 4.b, 4.c respectivamente), dicha fusión se presenta en la figura 1.a.. Se consideraron 10 puntos de control para la nueva georreferenciación de la imagen termográfica, lográndose la correcta alineación entre ambas imágenes. En caso necesario, es posible realizar el emparejamiento de la resolución entre las imágenes utilizando la herramienta *Calculadora Raster* en el software QGIS. Indicándose la nueva resolución mediante la definición de la *cantidad filas y columnas*, o de manera automática mediante el botón de *extensión a la capa actual*, la herramienta efectúa el ajuste.

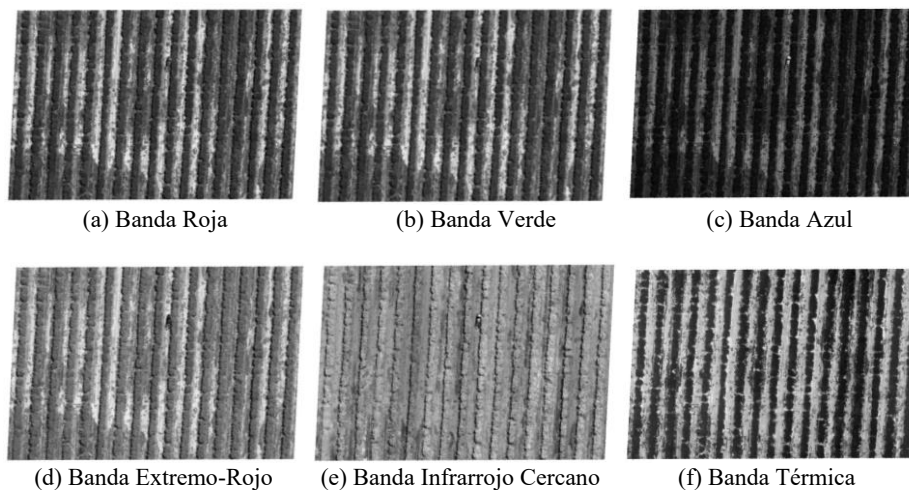


Fig. 3. Ortomosaicos obtenidos al finalizar el procesamiento de reconstrucción (mapas de reflectancia): de (a) hasta (e) corresponden a las cinco bandas de la cámara multispectral Mica-Sense RedEdge, mientras que (f) corresponde a la cámara termográfica Flir Vue640R.

2.5 Mapa termográfico y temperatura del cultivo

La determinación de la temperatura de la cobertura del cultivo (T_c) dentro de cada parcela se realiza con el mapa termográfico mostrado en figura 3.f. La temperatura se estableció como el valor promedio de los píxeles incluidos dentro de la parcela.

El procesamiento de los mapas de temperatura y de bandas multispectrales fue realizado con algoritmos escritos en el lenguaje Python [27]. Fue necesario integrar funciones de las librerías OsGeo, GDal, NumPy, SciPy, y Matplotlib. El editor de programación utilizado fue Spyder 4, que se encuentra en la plataforma de desarrollo de software Anaconda [28].

En el tratamiento de las imágenes térmicas es de suma importancia contemplar los efectos de distorsión o contaminación de bordes, que suelen presentarse cuando hay dos objetos continuos con diferentes temperaturas. En el presente caso de estudio, los efectos de distorsión se observan entre el cultivo y el suelo, o entre el cultivo y la sombra del mismo. Al mediodía solar ocurre que los efectos de la proyección de las sombras del cultivo se reducen al mínimo, en ese momento las imágenes térmicas se componen principalmente de cobertura vegetal, suelo, y píxeles mixtos planta-suelo. Estos últimos se ubican en el borde (o límite) de la cobertura vegetal con el suelo, formándose un efecto denominado “corona” alrededor del cultivo, dicho efecto suele estar más acentuado en cultivos leñosos altos como se presenta en [15]. En el presente caso de estudio, donde la formación del olivar es en seto, el efecto corona se observó en los bordes externos; es por ello que, para el cálculo de temperatura promedio, solo se consideraron los píxeles de la zona central de la copa de los olivos, despreciando los píxeles en los bordes.

Para diferenciar y extraer en el mapa termográfico todos aquellos píxeles que únicamente corresponden a la vegetación se ha requerido el diseño de algoritmos computacionales en Python. Estos píxeles pueden separarse de diferentes maneras, en el presente trabajo solamente se analizan las dos metodologías. Una alternativa es trabajar en el mapa termográfico con un filtrado por umbral (de temperatura); mientras que la segunda metodología consiste en diseñar una capa de corte creada a partir del análisis de otros mapas o bandas disponibles.

En la primera opción la separación de los píxeles de vegetación se basa en el análisis de un histograma bimodal generado a partir de la frecuencia (cantidad de píxeles) del mapa termográfico. En el histograma se diferencian claramente dos picos, asociados a la concentración de píxeles de temperatura del cultivo y del suelo (figura 4). En referencia a esta metodología, en [29] se aplicaron tres reglas de filtrado para separar los píxeles correspondientes a la cobertura vegetal de olivos, considerando como factor de corte $1/2$ (full width at half maximum, FWHM), $1/5$ (FWFM) y $1/8$ (FWEM) del valor de máxima frecuencia de temperatura del cultivo.

La metodología presenta la ventaja de ser sencilla de implementar, pero se requiere un análisis posterior a la etapa de filtrado para ajustar el umbral de corte de manera conveniente y lograr la separación de píxeles. El valor de umbral de corte no debe generalizarse en futuros procesamientos o para otros cultivos; por lo tanto, el umbral deberá ajustarse cada vez que se haga el filtrado de la imagen termográfica.

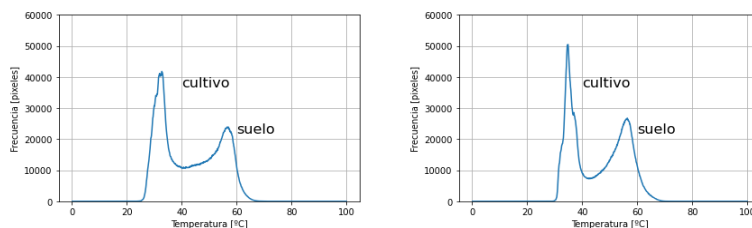


Fig. 4. Histograma bimodal obtenido del análisis del ortomosaico de temperatura para los días 27/12/2017 (izq) y 16/02/2018 (der).

En la segunda metodología de filtrado se emplea una capa (o lienzo) de corte. La capa se genera a partir del cálculo de un índice de vegetación y definiendo un umbral de corte sobre el mismo; para la obtención del índice se requiere de los ortomosaicos de las bandas multiespectrales. En referencia a la implementación de esta metodología, en [30] se aplicaron diferentes umbrales del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), en un olivar intensivo, para separar con éxito la vegetación de las sombras y los píxeles del suelo iluminados por el sol. En [26] se analiza la temperatura en el cultivo de papas, la separación de píxeles se realiza con una capa generada a partir un índice de vegetación que resulta de combinar imágenes en las bandas rojo, verde y azul (VI_{RGB}). Esta metodología presenta ventajas frente a la primera; una de ellas, es que se eliminan con alta precisión los píxeles correspondientes a sombras, efecto corona, o píxeles de similar temperatura al cultivo pero que corresponden a objetos o cuerpos extraños no deseados en el análisis (cañerías de riego, suelo mojado, charcos de agua, vehículos, personal de campo, etc.). Como desventajas a la primera opción, se debe contar con información de otras bandas para calcular la máscara

de corte. Para que el corte sea exitoso y preciso, debe existir alta coincidencia de alineación y emparejamiento entre los ortomosaicos, la máscara y la imagen a recortar.

En el presente trabajo, se ha generado una máscara de corte a partir del mapa de NDVI del cultivo. Analizando el histograma bimodal de cada imagen (figura 5) se define el umbral de corte en $NDVI > 0.7$. Las capas de corte resultantes fueron utilizadas para lograr el recorte de la imagen termográfica a fin de obtener los pixeles de interés, que corresponden solamente al cultivo, la mismas se presentan en la figura 6.

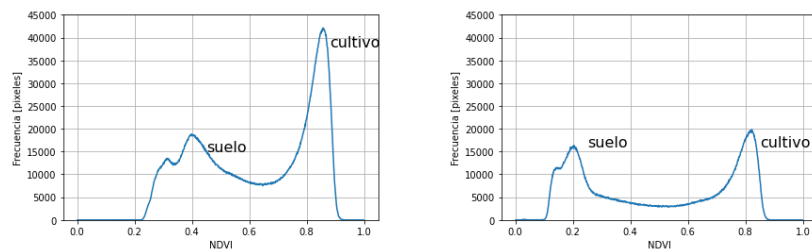


Fig. 5. Histograma bimodal del mapa NDVI en los días 27/12/2017 (izq) y 16/02/2018 (der).

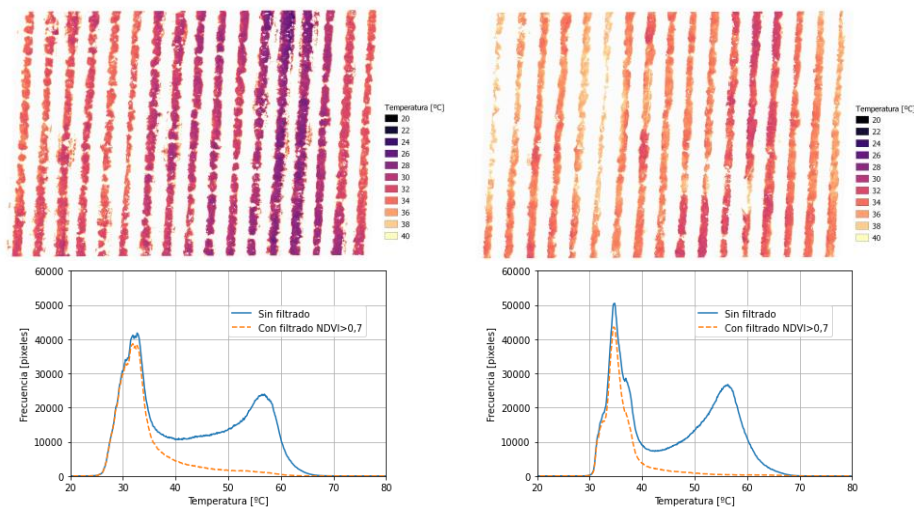


Fig. 6. Mapa termográfico de alta resolución de la zona con vegetación (recortadas en base a capa $NDVI > 0,7$) para los días 27/12/2017 (izq) y 16/02/2018 (der) y respectivos histogramas.

2.6 Cálculo del Índice de Estrés Hídrico del Cultivo (CWSI)

El CWSI se basa en la diferencia entre las temperaturas de la hoja y del aire normalizadas a la variación en las condiciones meteorológicas ambientales [13]. Jackson y colaboradores, en [32] definen al CWSI como la diferencia entre la temperatura del aire (T_a) y del dosel vegetal del cultivo (T_c) normalizado para la demanda evaporati-

va, determinado por medio de un límite inferior (cultivo en que el dosel transpira a su velocidad potencial con sus estomas totalmente abiertos) y un límite superior (dosel que no transpira con sus estomas completamente cerrados), como se muestra en la ecuación 2. Los límites superior e inferior se denotan con UL y LL, respectivamente.

$$CWSI = \frac{(Tc - Ta) - (Tc - Ta)_{LL}}{(Tc - Ta)_{UL} - (Tc - Ta)_{LL}} \quad (2)$$

Otra representación similar, es dada por Jones [33]. El CWSI se define entre las temperaturas límites superiores e inferiores, T_{dry} y T_{wet} , que representan una hoja en estado de no transpiración y una hoja en estado completamente transpirando, respectivamente, como se observa en la ecuación 3. Las temperaturas de referencia, T_{dry} y T_{wet} , pueden establecerse de manera empírica, teórica o estadística [31][34].

$$CWSI = \frac{Tc - T_{wet}}{T_{dry} - T_{wet}} \quad (3)$$

El CWSI toma valores entre 0 y 1 indicando condiciones bien regadas o de déficit hídrico, respectivamente.

Para el cálculo del índice se empleó la ecuación 3 y los valores indicados en la tabla 1. Las temperaturas de referencia se determinaron como: $T_{dry} = T_{aire} + 5^{\circ}C$ (según se realizó [35]), T_{wet} ha sido estimada como el promedio del 5% de los pixeles más fríos contenidos en el mapa termográfico recortado (según se realizó [15]), y Tc se obtiene de cada pixel del mapa termográfico. La figura 7 muestra los mapas de CWSI.

Tabla 1. Parámetros utilizados en el cálculo de CWSI

| Día | Hr [%] | Taire [°C] | Tdry [°C] | Twet [°C] |
|------------|--------|------------|-----------|-----------|
| 27/12/2017 | 36 | 29,7 | 34,7 | 28 |
| 16/02/2018 | 37 | 33,8 | 38,8 | 32 |

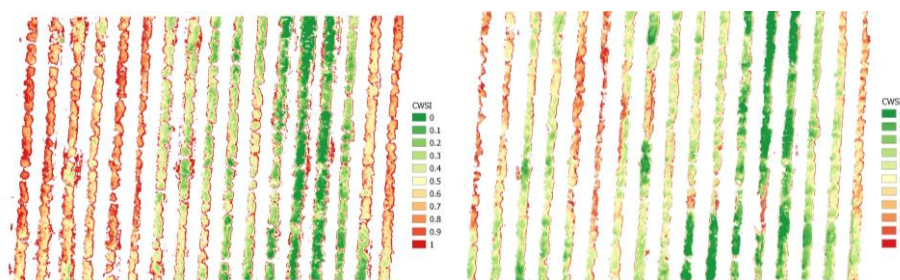


Fig. 7. Mapa CWSI obtenidos a partir de imágenes termográficas de alta resolución tomadas desde un dron a las 13:30hs, en los días 27/12/2017 (izq) y 16/02/2018 (der).

3 Resultados

Los valores promedio de Tc, CWSI y NDVI obtenidos en los diferentes tratamientos de riego fueron extraídos desde cada bloque en donde se midió el Ψ_h , según se precisó en la figura 1. Este proceso se realizó con la herramienta de “Estadística de Zonas”, dentro de la biblioteca de procesos de Q-GIS. En la tabla 2 se presentan los valores obtenidos; mientras que, en la figura 8 se trazan las relaciones entre Ψ_h frente a Tc, CWSI y NDVI, observándose fuertes correlaciones.

Tabla 2. Valores promedio de temperatura de cultivo (Tc), CWSI y NDVI, afectados por los diferentes niveles de riego, en dos días diferentes durante la campaña 2017/18, en un olivar Arbequina de alta densidad con riego por goteo, San Juan, Argentina.

| Tratamiento de riego | 27/12/2017 | | | | 16/2/2018 | | | |
|----------------------|------------|------|------|----------------|-----------|------|------|----------------|
| | Tc [°C] | CWSI | NDVI | Ψ_h [Mpa] | Tc [°C] | CWSI | NDVI | Ψ_h [Mpa] |
| T ₄₀ | 34,7 | 0,83 | 0,70 | -2,17 | 38,3 | 0,85 | 0,65 | -3,33 |
| T ₆₀ | 31,8 | 0,53 | 0,77 | -1,98 | 34,8 | 0,47 | 0,71 | -2,92 |
| T ₇₀ | 34,2 | 0,80 | 0,81 | -1,74 | 37,7 | 0,83 | 0,74 | -2,52 |
| T ₈₀ | 33,5 | 0,74 | 0,79 | -1,86 | 36,3 | 0,65 | 0,75 | -2,22 |
| T ₉₀ | 31,6 | 0,41 | 0,79 | -1,61 | 35,4 | 0,49 | 0,74 | -2,29 |
| T ₁₀₀ | 30,4 | 0,29 | 0,80 | -1,66 | 34,4 | 0,33 | 0,77 | -2,06 |
| T ₁₂₀ | 33,0 | 0,60 | 0,80 | -1,50 | 35,1 | 0,45 | 0,75 | -1,69 |

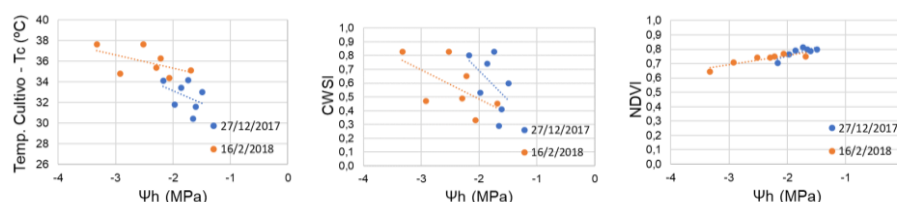


Fig. 8. Relación entre el potencial hídrico de hoja (Ψ_h) y la temperatura del cultivo, CWSI y NDVI en los días 27/12/2017 y 16/02/2018.

Una de las principales ventajas de un mapa de Tc o CWSI es que los valores se pueden traducir directamente como un indicador de estrés hídrico. Particularmente el CWSI está normalizado para las condiciones climáticas y las características del cultivo. En el mapa de Tc (figura 6) se observan mayores niveles de temperatura en los cultivos situados en las parcelas con tratamientos de restricción. En complemento, con el cálculo del mapa de CWSI (figura 7) es posible identificar las zonas con estrés hídrico de manera efectiva. Para facilitar la lectura del mapa de CWSI, dado que es conocida la relación con el Ψ_h , se clasifica en cuatro niveles de estrés hídrico de la siguiente manera: $<0,4$ “sin estrés”; entre $0,4$ a $0,6$ “estrés bajo”, entre $0,6$ a $0,8$ “estrés medio”, y $> 0,8$ “estrés severo”. A continuación, se presenta un mapa clasificado según la condición de estrés hídrico y la demarcación de los siete tratamientos de riego.

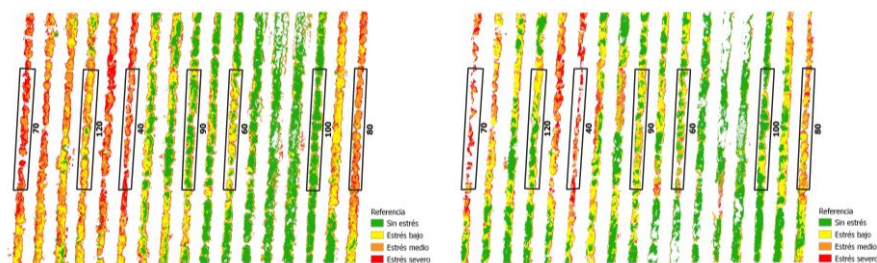


Fig. 9. Clasificación del estado hídrico del olivar el día 27/12/2017 (izq) y 16/02/2018 (der).

Respecto al NDVI, en los histogramas presentados en la figura 5 se observó el marcado contraste entre la zona cultivada y el suelo, lo que permitió generar la capa de corte para el mapa Tc. Sin embargo, el NDVI resultó ser poco sensible a la variación del Ψ_h , registrándose una diferencia 0,04 entre el tratamiento T₁₂₀ y el T₆₀. Particularmente el tratamiento T₄₀ presenta el menor nivel de NDVI debido al bajo desarrollo vegetativo y tamaño de la copa, como efecto resultante del alto estrés hídrico.

En la parcela de T₁₀₀, el riego fue programado para cubrir la totalidad de la demanda hídrica, no se ocasionó estrés hídrico en el cultivo. Allí se registró el nivel más bajo de CWSI (0,29 y 0,33), asociados a registros de Tc más bajos (30,4°C y 34,4°C).

En la parcela T₄₀, el riego fue restringido de manera drástica, así se indujo estrés hídrico severo en el olivo. En la parcela se registraron los valores más elevados del CWSI (0,83 y 0,85) y en Tc promedio (34,7°C y 38,3°C). Esto corresponde a un incremento aproximado en CWSI de 0,52 y en la Tc de 4°C con relación al T₁₀₀.

Las variaciones de las condiciones de estrés en el olivar han sido claramente identificadas mediante el análisis de Tc, CWSI y Ψ_h . La metodología implementada para el cálculo del CWSI ha resultado adecuada, lográndose la generación de un mapa de CWSI georeferenciado de alta resolución y, mediante la correlación con el Ψ_h , la posterior verificación como un indicador sensible a los efectos de estrés hídrico en el olivo. Similares valores de CWSI vs. Ψ_h fueron publicados como resultados en [36].

Es común observar que el análisis del CWSI se realiza una vez durante la campaña [5][9][15][16][30][32], durante el periodo sensible del cultivo ante condiciones de estrés hídrico que afecten la productividad. En el presente trabajo se analizaron dos días, al inicio y avanzado el verano. En base a los resultados presentados en la tabla 2 y la figura 8, se observó que, a pesar de la alta correlación entre el Ψ_h frente a Tc y CWSI, no es posible generalizar la ecuación de correlación para toda la campaña, ya que se aprecian diferencias significativas entre los días analizados.

En el día 27/12/2017 la diferencia de los niveles de Ψ_h registrados en cada tratamiento de riego es baja, por ello se observa la concentración de los valores en la gráfica 8. Por otro lado, en el día 16-2-2018 los niveles de Ψ_h se han diferenciado en mayor medida, debido a la influencia de la restricción hídrica en el cultivo; por lo cual se aprecia mayor distribución de las mediciones de Ψ_h .

En la experiencia se lograron otros resultados de gran relevancia sobre los efectos del estrés hídrico en la productividad del olivar, estos han sido presentados en [37].

5. Conclusiones

En el manuscrito se presentó una metodología para el cálculo del índice CWSI para la detección de estrés hídrico en un olivar mediante el análisis de imágenes termográficas. La alta resolución espacial de las imágenes multiespectrales y termográficas, que fueron recopiladas con cámaras aerotransportadas en un dron, permitieron identificar espacialmente los efectos térmicos generados por el estrés hídrico de los cultivos ante diferentes regímenes de riego. El método presentado tiene aplicaciones potenciadas en la detección del estrés hídrico y la programación adecuada del riego en el contexto de la agricultura de precisión.

Los resultados obtenidos en cada parcela demostraron que las variaciones de temperatura en la cobertura vegetal asociadas a las condiciones de estrés hídrico en el olivo se logran detectar a nivel de planta, registrándose diferencias de temperatura mayores para los tratamientos de riego deficitario (T_{90} , T_{80} , T_{70} , T_{60} y T_{40}) en comparación con plantas bien regadas (T_{100}), con diferencias de 2°C en plantas con estrés moderado y entre $2,5$ a 4°C en plantas con estrés severo.

Agradecimientos

El trabajo se ha efectuado en marco del proyecto PIO N°84, “TELEMETRÍA AGRÍCOLA” financiado por CONICET y SECITI del Gobierno de San Juan y el proyecto “Desarrollo de una herramienta para la determinación de estrés hídrico en cultivos basada en la medición continua de la temperatura del dosel vegetal” línea CICITCA financiado por la Universidad Nacional de San Juan. Se contó con soporte de INTA EEA San Juan. Un especial agradecimiento a Juan José Farias y Esteban Santipolío de “Establecimiento San Francisco S.A.” por permitirnos el acceso a los huertos de olivo comerciales. También agradecemos a Jorge Díaz, Sergio Bota, Franco Barceló y Hugo Toledo por el apoyo técnico en el campo.

Referencias

1. Gómez del Campo, M.; Morales Sillero, A.; Vita Serman, F.; Rousseaux, M. C.; Searles, P. S.: El olivar en los valles cálidos del Noroeste de Argentina. *Olivae*, 114, pp. 23-45. (2010).
2. Doorenbos J. y Pruitt W. O.: Guidelines for predicting crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 24, Roma, Italia. (1976)
3. Smith R. J., Baillie J. N., Mc Carthy A. C., Raine, S. R., Baillie C. P.: Review of precision irrigation technologies and their application. National Centre for Engineering in Agriculture. University of Southern Queensland. Toowoomba. (2010)
4. Pereira L. S., Cordery L., Iacovides I.: Improved indicators of water use performance and productivity for sustainable water conservation and saving. *Agricultural Water Management*, vol 108, pp 39–51, (2012)
5. Gonzalez-Dugo V., Goldhamer D., Zarco-Tejada P.J., Fereres, E.: Improving the precision of irrigation in a pistachio farm using an unmanned airborne thermal system, *Irrig Sci* 33:43–52; DOI: 10.1007/s00271-014-0447-z (2015)
6. Zhang C. y J. M. Kovacs: The application of small unmanned aerial systems for precision agriculture: a review. *An Int Jour on Advances in Precision Agriculture*, pp.693-712. (2012)
7. Mulla David J.: Twenty five years of remote sensing in precision agriculture: Key advances and remaining knowledge gaps, *Biosystems Engineering*, 114(4), pp 358-371. (2013)
8. Gitelson A A, Stark R, Grits U, Rundquist D C, Kaufman Y J, Derry D.: Vegetation and soil lines in visible spectral space: a concept and technique for remote estimation of vegetation fraction. *IntJ Remote Sensing* 23: 2537– 2562 (2002)
9. Gitelson A A, Viña A, Arkebauer T J, Rundquist D C, Keydan G P, Leavitt B.: Remote estimation of leaf area index and green leaf bio-mass in maize canopies. *Geophys Res Lett* 30 (5) 1248 (2003)
10. Gitelson A. A.: Wide Dynamic Range Vegetation Index for Remote Quantification of Biophysical Characteristics of Vegetation, *Journal of Plant Physiology*, 161(2), pp 165-173. (2004)

11. Moran M S, Inoue Y, Barnes E M: Opportunities and limitations for image-based remote sensing in precision crop management. *Remote Sens Environ* 61: 319 – 346 (1997)
12. Colombo R., Bellingeri D., Fasolini D., Marino C. M.: Retrieval of leaf area index in different vegetation types using high resolution satellite data, *Remote Sensing of Environment*, 86(1), pp 120-131. (2003)
13. Idso S.M Jackson, Ray; Pinter, Jr. Paul; Reginato, Robert y Hatfield, J.: Normalizing the stress-degree-day parameter for environmental variability". *Agricultural Meteorology*. 24, pp 45-55. (1981)
14. Gates D.M.: Leaf temperature and transpiration. *Agronomy Journal* 56, pp 273–277. (1964)
15. Gonzalez-Dugo V., Zarco-Tejada P., Nicolás E.: Using high resolution UAV thermal imagery to assess the variability in the water status of five fruit tree species within a commercial orchard. *Precision Agric* 14, 660–678 (2013).
16. Ballester C., Zarco-Tejada P. J., Nicolás E., Alarcón J. J., Fereres E., Intrigliolo D. S., Gonzalez-Dugo V.: Evaluating the performance of xanthophyll, chlorophyll and structure-sensitive spectral indices to detect water stress in five fruit tree species. *Precision Agric* 19, 178–193. (2018)
17. Zarco-Tejada, P. J., Gonzalez-Dugo, V., Williams, L. E., Suárez, L., Berni, J. A. J., Goldammer, D.: A PRI-based water stress index combining structural and chlorophyll effects: Assessment using diurnal narrow-band airborne imagery and the CWSI thermal index. *Remote Sensing of Environment*, 138, 38–50. (2013)
18. Babelis G. C., Serman Vita, Sierra, E. M F.: Adaptación agroclimática del olivo y otras especies frutales en el Valle de Tulúm, 1er ed. Consejo Federal de Inversiones (CFI), Buenos Aires, Argentina (2013)
19. Allen R. G., Pereira L. S., Raes D., Smith, M.: Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements. *FAO Irrigation and Drainage Paper Vol 56*. FAO, Rome, Italy. (1998)
20. Villalobos F. J., Orgaz F., Testi L., Fereres E.: Measurement and modeling of evapotranspiration of olive (*Olea europaea* L.) orchards. *Eur. J. Agron.* 13, 155–163. (2000)
21. Hanks R. J., Keller J., Rasmussen V. P., Wilson G.D.: Line source sprinkler for continuous variable irrigation-crop production studies. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 40, 426–429. (1976)
22. Hanks R.J., Sisson D.V., Hurst R.L., Hubbard K.G.: Statistical analysis of results from irrigation experiments using the line-source sprinkler system. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44, 886–888. (1980)
23. Capraro F., Tosetti S., Rossomando F., Mut V., Vita Serman F.: Web-based system for the remote monitoring and management of precision irrigation: a case study in an arid region of Argentina. *Sensors* 18, 3847. (2018)
24. Software de análisis de fotogrametría Pix4D Mapper. Disponible en: <https://www.pix4d.com/es>
25. Sistema de Información Geográfica libre QGIS: Disponible en: <https://www.qgis.org/es/site/>
26. Interfaz de programación de aplicaciones GDAL. Disponible en: <https://gdal.org/api/index.html>
27. Python Foundation. Disponible en: <https://www.python.org/psf/>
28. Plataforma de desarrollo Anaconda. Disponible en: <https://www.anaconda.com/products/individual>
29. Egea G., Padilla-Díaz C. M., Martínez-Guanter J., Fernández J. E., Pérez-Ruiz M.: Assessing a crop water stress index derived from aerial thermal imaging and infrared thermometry in super-high density olive orchards, *Agricultural Water Management*, 187, pp 210-221 (2017)
30. Sepulcre-Cantó G., Zarco-Tejada P.J., Jiménez-Muñoz J.C., Sobrino J.A., de Miguel E., Villalobos F.J.: Detection of water stress in an olive orchard with thermal remote sensing imagery, *Agricultural and Forest Meteorology*, 136(1–2), pp 31-44. (2006)
31. Rud R., Cohen Y., Alchanatis V., Levi A., Brikman R., Shenderey C., Heuer B., Markovitch T., Dar Z., Rosen C., Mulla D., Nigon T.: Crop water stress index derived from multi-year ground and aerial thermal images as an indicator of potato water status. *Precision Agric* 15, 273–289. (2014)
32. Jackson R., Idso S., Reginato R., Pinter P. J.: Canopy temperature as a crop water stress indicator. *Water Resources Research*, 17, pp. 1133–1138. (1981)
33. Jones H. C.: Plants and microclimate, 2nd ed.. Capítulo: Crop water stress index, pp. 293–295. Cambridge. Cambridge University Press. (1992)
34. Bellvert Ríos J. El uso de la teledetección de alta resolución como herramienta para realizar un manejo eficiente del riego en viñedos. Tesis doctoral. Dpto. de Agronomía. Univ. de Córdoba. España. (2014)
35. Ben-Gal A., Agam N., Alchanatis V., Cohen Y., Yermiyahu U., Zipori I., Presnov E., Sprintsin. M., Dag A: Evaluating water stress in irrigated olives: Correlation of soil water status, tree water status, and thermal imagery. *Irrigation Science*, 27, pp. 367-376. (2009)
36. Berni J. A. J., Zarco-Tejada P. J., Sepulcre-Cantó G., Fereres E., Villalobos F.: Mapping canopy conductance and CWSI in olive orchards using high resolution thermal remote sensing imagery. *Remote Sensing of Environment*, vol 113 (11), pp 2380-2388. (2009)
37. Vita Serman F., Orgaz F., Starobinsky G., Capraro F., Fereres E.: Water productivity and net profit of high-density olive orchards in San Juan, Argentina. *Ag. Water Management*, vol. 252, 106878. (2021)