

## EL PARQUE NATURAL DEL CARRASCAL DE LA FONT ROJA COMO LABORATORIO PARA INVESTIGAR EL IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA VEGETACIÓN MEDITERRÁNEA

E. Vicente Bartolí<sup>1</sup>, A. Maturano Ruiz<sup>2</sup>, D. Martínez Giménez<sup>3</sup>, A. Vilagrosa Carmona<sup>4</sup>, A. Bonet Jornet<sup>5</sup> y J. Bellot Abad<sup>6</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Ecología. IMEM Ramón Margalef. Universidad de Alicante. Correo electrónico: evbartoli222@gmail.com

<sup>2</sup> Departamento de Ecología. Universidad de Alicante. Correo electrónico: adrian.maturano.ruiz@gmail.com

<sup>3</sup> Estación Científica Font Roja Natura UA. Vicerrectorado de Investigación, Desarrollo e Innovación. Universidad de Alicante. Correo electrónico: delfina.martinez@ua.es

<sup>4</sup> Fundación CEAM. Unidad conjunta de investigación Universidad de Alicante – CEAM. Correo electrónico: a.vilagrosa@ua.es

<sup>5</sup> Estación Científica Font Roja Natura UA. Vicerrectorado de Investigación, Desarrollo e Innovación. Departamento de Ecología. IMEM Ramón Margalef. Universidad de Alicante. Correo electrónico: andreu@ua.es

<sup>6</sup> Departamento de Ecología. IMEM Ramón Margalef. Universidad de Alicante. Correo electrónico: juan.bellot@ua.es

**Resumen.** Las proyecciones del cambio climático indican que en el área mediterránea se producirá un aumento en la frecuencia de sequías extremas, lo que causará impactos en sus masas forestales y en los servicios ecosistémicos que estas prestan. En los últimos años se han registrado eventos de decaimiento y mortalidad asociados a fuertes sequías, los cuales se pueden considerar representativos de los previstos por el cambio climático, por lo que su estudio es una oportunidad para comprender y predecir cómo se verán afectados los bosques mediterráneos en el futuro. Este es el principal objetivo del nuevo proyecto de investigación liderado por la Universidad de Alicante y el CEAM y cuyo propósito es profundizar en el conocimiento de estas cuestiones. Para ello se está llevando a cabo el análisis detallado de distintas variables ecohidrológicas y ecofisiológicas en masas forestales de distintas zonas experimentales de la Comunidad Valenciana, dos de las cuales se hallan en el Parque Natural del Carrascal de la Font Roja. En este artículo se presentan los principales objetivos del citado proyecto, así como sus instalaciones experimentales en el Parque Natural.

**Palabras clave.** cambio climático, sequía, mortalidad, balance hídrico, estrés, transpiración.

**Resum.** Les projeccions de canvi climàtic indiquen que a l'àrea mediterrània es produirà un augment en la freqüència de sequeres extremes, el que causarà impactes en les seues masses forestals i en els servicis ecosistèmics que aquestes presten. En els últims anys s'han registrat esdeveniments de decaïment i mortalitat associats a fortes sequeres, les quals es poden considerar representatives de les previstes pel canvi climàtic. Per tant, el seu estudi és una oportunitat per a comprendre com es veuran afectats els boscos mediterranis en el futur. Aquest és el principal objectiu d'un nou projecte d'investigació liderat per la Universitat d'Alacant i el CEAM i es tracta d'aprofundir en el coneixement d'aquestes qüestions. Per a això s'està duent a terme l'anàlisi detallat de distintes variables ecohidrològiques i ecofisiològiques en masses forestals de diferents zones experimentals de la Comunitat Valenciana, dues de les quals es troben en el Parc Natural del Carrascal de la Font Roja. En aquest article es presenten els objectius específics de l'esmentat projecte, així com les seues instal·lacions experimentals al Parc Natural.

**Paraules clau.** canvi climàtic, sequera, mortalitat, balanç hídric, estrés, transpiració.

**Summary.** Global change projections point out an increase in the number of severe droughts in the Mediterranean region, which may have a deep impact in forests and in environmental services they provide. In the past years, events of drought-induced decay and plant mortality have been registered in this region, which are considered representative of climatic change consequences. Hence, their study is a good chance to understand and foresee how Mediterranean forests will be affected by climate change in the future. This is the main purpose of the new research project carried out by University of Alicante and CEAM foundation whose main goal is improve our actual knowledge in this topic. To achieve this, an exhaustive study of forest's ecohydrological and ecophysiological variables is being carried out in several experimental sites through the Valencian Community, two of them located within kermes oak forest of Font Roja Natural Park. In this paper, we introduce the main project goals and the experimental design of Natural Park's study sites.

**Keywords.** climatic change, drought, mortality, water balance, stress, transpiration.

## INTRODUCCIÓN

Las proyecciones de cambio climático en el área mediterránea estiman un aumento de la temperatura junto con una disminución en las precipitaciones, así como un incremento en la frecuencia de las sequías extremas (IPCC, 2013; Allen *et al.* 2010). Es de esperar que bajo estas condiciones se produzcan cambios relevantes en los ecosistemas y en las comunidades vegetales; de modo que mientras que algunas especies serán capaces de adaptarse, otras se verán desplazadas, llegando a extinguirse en los casos más extremos, viéndose así modificada la composición y estructura de dichas comunidades (Peñuelas *et al.* 2007; McDowell & Allen, 2015). A su vez, esto se traducirá en alteraciones en la propia funcionalidad de las masas forestales; en su balance hídrico y en los servicios ambientales que prestan, como la recarga de acuíferos, la fijación de carbono y la adecuada protección del suelo (Grace, 2004; Bonan, 2008; Frank *et al.*, 2015; García-Fayos, 2008).

En las últimas décadas, a escala global, se han registrado eventos de mortalidad en masas forestales asociados a sequías que pueden constituir los primeros síntomas cuantificables del cambio climático (Allen *et al.* 2010; Greenwood *et al.*, 2017). Por su parte, en el área mediterránea, se han producido episodios extremadamente cálidos y secos, como el ocurrido en 2014 (García de la Serrana *et al.*, 2015), con efectos visibles, destacando la mortalidad, en poblaciones de *Pinus halepensis* Mill., *Quercus rotundifolia* Lam. y *Quercus coccifera* L.; así como la importante sequía de 2004, que tuvo una especial incidencia en el carrascal de Font Roja afectando a numerosos individuos de *Quercus rotundifolia*.

Se considera que las consecuencias de estas sequías son un buen ejemplo de las condiciones climáticas previstas en las proyecciones futuras. Por lo tanto, a través de su estudio se podrán in-

ferir los impactos del cambio climático sobre las comunidades vegetales con más detalle, convirtiéndose el estudio de eventos intensos de sequía en un campo de investigación de creciente interés para la ecología.

Respecto a ello, existe un importante número de estudios que versan sobre cómo las plantas se ven afectadas por la escasez de agua, focalizándose en los mecanismos que subyacen a la vulnerabilidad y mortalidad de las mismas.

En primer lugar, tienen especial relevancia las estrategias de las plantas para hacer frente a la sequía. Principalmente se distinguen dos tipos: isohídricas y anisohídricas. Las primeras son capaces de regular su conductividad estomática en condiciones de poca disponibilidad de agua, reduciendo la tasa de transpiración y manteniendo los potenciales hídricos de las hojas relativamente constantes; mientras que las segundas ejercen un menor control estomático y son capaces de mantener niveles altos de transpiración en condiciones de déficit hídrico (McDowell *et al.*, 2008). La primera estrategia, a diferencia de la segunda, reduce la vulnerabilidad de las plantas al riesgo de cavitación del xilema; sin embargo, el cierre de los estomas limita la asimilación de carbono al reducir el intercambio de gases, favoreciendo un balance negativo y el consecuente agotamiento de los carbohidratos de reserva, lo que también puede llegar a provocar la muerte de los individuos bajo condiciones de sequía intensa o una mayor susceptibilidad a sufrir ataques de parásitos por su menor capacidad de respuesta y menor vigor (McDowell & Sevanto, 2010; Tague *et al.*, 2013).

Por su parte, el incremento de temperaturas está previsto que agrave los riesgos anteriormente descritos, además de que aumentará las posibilidades de que se produzcan otros factores detonantes de mortalidad en los bosques mediterráneos, como el ataque de plagas u hongos,

además de un mayor riesgo de incendios? forestales (Williams et al., 2012; Grossiord et al. 2016).

En relación con esto, se observa cierto consenso entre estudios concluyendo que las especies con estrategia isohídrica serán más vulnerables al incremento en la frecuencia de las sequías, vaticinando un cambio en la composición de las masas forestales a favor de especies con estrategias anisohídricas (Poyatos et al., 2013; Grossiord et al., 2014; Forner et al., 2014).

Sin embargo, muchos de los procesos anteriormente introducidos aún están lejos de comprenderse en su totalidad, además de que gran parte de su conocimiento proviene de experimentos realizados con plantas bajo condiciones controladas, distintas a las existentes en campo. Por estos

motivos continúan existiendo necesidades importantes de investigación en este campo.

Del mismo modo, existe incertidumbre sobre cómo afectará el cambio climático, junto con sus alteraciones sobre las comunidades vegetales, al balance hídrico de los ecosistemas. En términos generales, se espera que se reduzcan las tasas de infiltración e incrementen las de escorrentía (agua azul), a la vez que se produzca una disminución del consumo de agua mediante transpiración (agua verde), pero es presumible que al mismo tiempo incrementará la evaporación (agua verde) desde el suelo (Bonan, 2008). Los interrogantes surgen entonces en la cuantificación de los citados flujos, así como de sus efectos sobre las reservas de agua directamente utilizables tanto por las plantas como por la sociedad.

## EL PROYECTO ALTERACLIM

En el marco de estas necesidades de investigación, la Universidad de Alicante junto con la fundación CEAM han puesto en marcha un proyecto de investigación, denominado con el acrónimo ALTERACLIM (Referencia CGL2015-69773-C2-1-P, MINECO/FEDER), cuyo objetivo general consiste en profundizar en el conocimiento de los conceptos anteriormente mencionados. En este proyecto se plantea la pregunta de si el incremento en la frecuencia de sequías extremas derivará en cambios irreversibles en la composición y cubierta vegetal de los ecosistemas mediterráneos, produciendo en consecuencia alteraciones hidrológicas y funcionales en sus comunidades, aumentando el porcentaje de agua que es devuelta a la atmósfera mediante evapotranspiración y reduciendo aquella directamente aprovechable por la sociedad como el agua de acuíferos y cursos de agua superficiales.

De forma específica, se pretende cuantificar

los cambios en el consumo de agua de la cubierta vegetal inducidos por el cambio climático; estudiando y comparando el balance hídrico de masas forestales afectadas y no afectadas por eventos de sequía extrema, además de profundizar en el conocimiento de la vulnerabilidad y resiliencia de las especies y comunidades implicadas a dichos eventos.

Para ello se han seleccionado varias zonas experimentales en la Provincia de Alicante, las cuales se sitúan en un gradiente climático que va desde el mediterráneo subhúmedo al semiárido. Dos de estas zonas se encuentran dentro del Parque Natural del Carrascal de la Font Roja, la estación experimental de Font Roja (Alcoi) y la estación experimental de Torretes (Ibi), aprovechando las infraestructuras de la Universidad de Alicante en las dos Estaciones Científicas (Estación Científica Font Roja Natura UA y el Jardín Botánico y Estación Biológica Torretes-Font Roja).

## ZONAS DE ESTUDIO

La estación experimental de Font Roja se encuentra junto a la Estación Científica Font Roja Natural, en la zona de umbría del parque natural. Por su parte, la estación experimental de Torretes se encuentra junto a la Estación Biológica Torretes -

Font Roja, en la solana de la citada sierra. La figura 1 muestra un mapa de localización de ambas áreas de estudio, y sus características edáficas se resumen en la tabla 1.

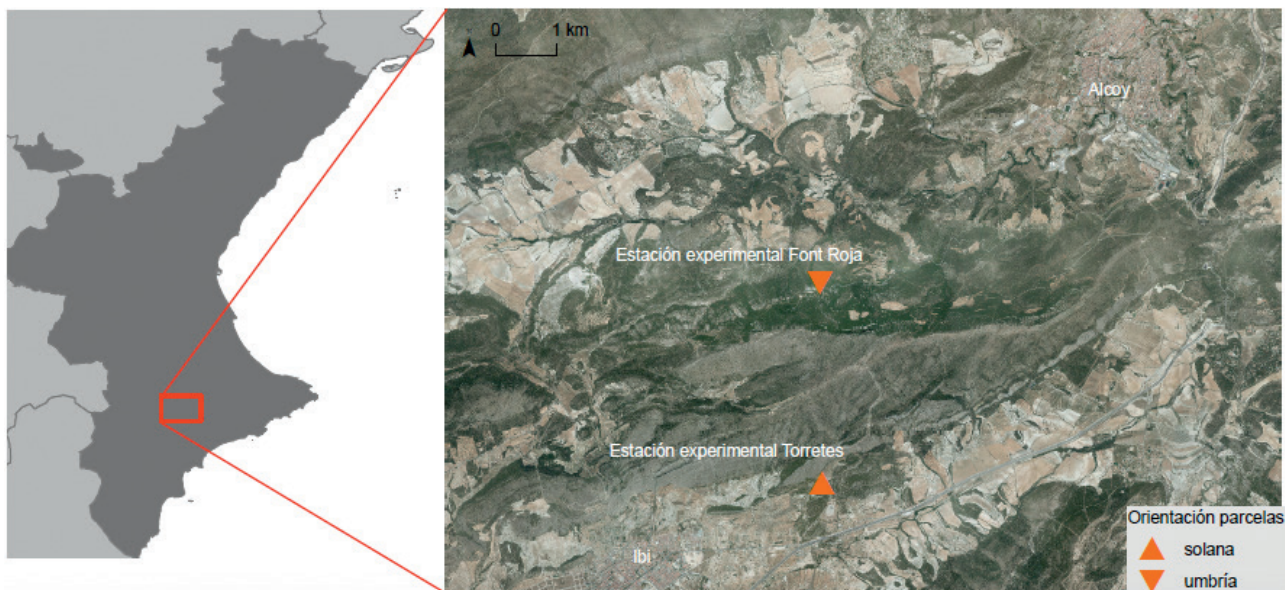


Fig.1. Localización de las zonas experimentales.

Tabla 1. Principales características fisicoquímicas de los suelos de las parcelas de estudio, determinadas según Juárez (2004). Media  $\pm$  std

| Parcela     | Hor.*            | Prof. muestreo (cm) | pH (1:2.5)    | C.E. (1:5) (dS/m) | CaCO <sub>3</sub> (%) | Mat Org (%)     | Dens. Ap. (g/cm <sup>3</sup> ) |
|-------------|------------------|---------------------|---------------|-------------------|-----------------------|-----------------|--------------------------------|
| Font Roja 1 | O                | 0 - 10              | 8.0 $\pm$ 0.1 | 0.29 $\pm$ 0.06   | 33.6 $\pm$ 3.3        | 32.4 $\pm$ 7.4  | 0.49 $\pm$ 0.10                |
|             | OAh <sub>1</sub> | 10 - 20             | 8.1 $\pm$ 0.1 | 0.24 $\pm$ 0.04   | 54.5 $\pm$ 8.4        | 15.1 $\pm$ 5.3  | -                              |
| Font Roja 2 | O                | 0 - 10**            | 7.7 $\pm$ 0.2 | 0.40 $\pm$ 0.11   | 9.6 $\pm$ 0.2         | 44.5 $\pm$ 13.2 | 0.34 $\pm$ 0.04                |
| Torretes    | Ah <sub>1</sub>  | 0 - 10              | 8.3 $\pm$ 0.0 | 0.20 $\pm$ 0.03   | 36.3 $\pm$ 4.8        | 13.4 $\pm$ 1.7  | 0.93 $\pm$ 0.11                |
|             | Ah <sub>2</sub>  | 10 - 20             | 8.5 $\pm$ 0.0 | 0.18 $\pm$ 0.00   | 56.5 $\pm$ 4.0        | 10.7 $\pm$ 1.1  | -                              |

\* Horizontes; O: Orgánico; Ah: Mineral superficial enriquecido con material orgánico.

\*\* No se pudo muestrear de 10 – 20 cm por falta de espesor del perfil del suelo.

Como se puede observar en la tabla 1, las características edáficas de la parcela de Font Roja se han dividido en dos bloques, esto es así debido a

que en la toma y análisis de muestras de suelo se observaron dos zonas claramente diferenciadas, su situación espacial se indica en la figura 2.

## DISEÑO EXPERIMENTAL

En cada una de las zonas experimentales se han seleccionado una serie de individuos sobre los que se hará un seguimiento periódico de variables ecohidrológicas y ecofisiológicas encaminado a lograr los objetivos de investigación propuestos.

El trabajo que se llevará a cabo en la estación de Font Roja servirá para caracterizar y comparar el estado y comportamiento de individuos afecta-

dos por sequía frente a individuos sanos. Por lo tanto, se estudiará un total de 18 árboles: 12 de la especie *Quercus rotundifolia*, dividiéndose en dos grupos de 6 árboles sanos y 6 afectados por sequía; y 6 individuos sanos de *Pinus halepensis*. La figura 2 muestra la distribución espacial de individuos monitorizados en la zona experimental de Font Roja, mientras que la tabla 2 indica los DBH de cada individuo seleccionado.



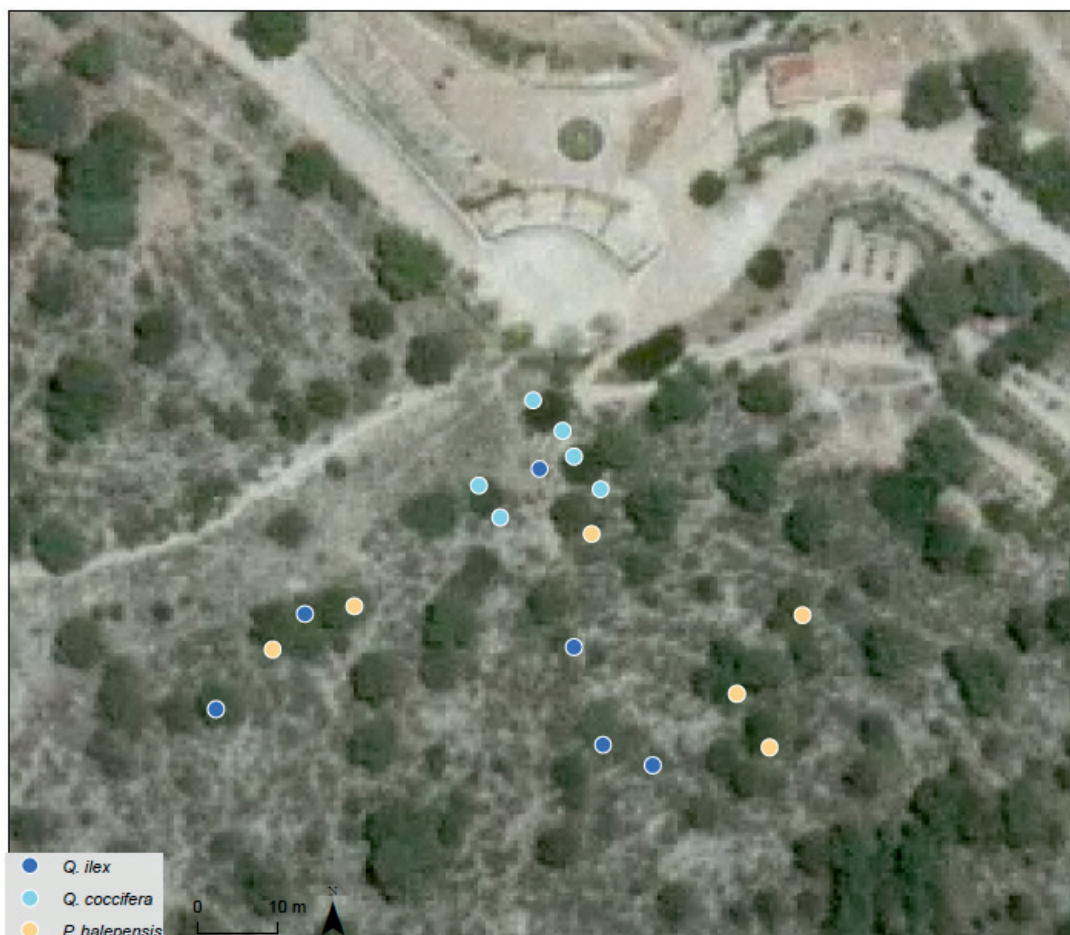
**Fig. 2.** Distribución de individuos muestreados en la estación experimental de Font Roja.

**Tabla 2.** DBH de los individuos seleccionados en la parcela de Font Roja.

| Tipo individuo                     | DBH $\pm$ error típico (cm) |
|------------------------------------|-----------------------------|
| <i>Q. rotundifolia</i> afectado    | 23,67 $\pm$ 1,27            |
| <i>Q. rotundifolia</i> no afectado | 30,30 $\pm$ 1,03            |
| <i>P. halepensis</i>               | 23,10 $\pm$ 3,18            |

Por su parte, la estación experimental de Torretes servirá para completar un estudio en el que se analizará el efecto del gradiente climático mencionado anteriormente sobre el comportamiento ecohidrológico y ecofisiológico de individuos de porte arbóreo y arbustivo. De nuevo, en esta zona

se han seleccionado 18 individuos, 6 de ellos de porte arbóreo pertenecientes a la especie *Pinus halepensis*, junto a 12 de porte arbustivo, de las especies *Quercus rotundifolia* y *Quercus coccifera*. La figura 3 muestra su distribución en la zona experimental mientras que la tabla 3 indica sus DBH.



**Fig 3.** Distribución de individuos muestreados en la estación experimental de Torretes

**Tabla 3.** DBH de los individuos seleccionados en la parcela de Torretes.

| Tipo                   | DBH $\pm$ error típico (cm) |
|------------------------|-----------------------------|
| <i>Q. coccifera</i>    | 9,85 $\pm$ 0,16             |
| <i>Q. rotundifolia</i> | 9,29 $\pm$ 1,81             |
| <i>P. halepensis</i>   | 25,83 $\pm$ 1,63            |

### VARIABLES REGISTRADAS

En ambas áreas de estudio se hará el seguimiento de las mismas variables. En cada uno de los individuos se están tomando medidas de flu-

jo de savia utilizando el método HRM (Burgess et al., 2001) y siguiendo las directrices de Del Campo et al. (2014) y Fernandes et al. (2016) en su apli-

cación para pinares de la Comunidad Valenciana. Según este método, se introducen 3 sondas en el tronco del árbol (foto 1), una de ellas emite un pulso de calor que es registrado por las otras dos, las cuales son capaces de medir la velocidad a la que se disipa dicho pulso (figura 5). Esta magnitud puede relacionarse matemáticamente con la velocidad de la savia en el punto de medida, por lo tanto, con el conocimiento adecuado de la fisiología de cada individuo, este dato puede utilizarse para calcular su flujo de savia. Estos datos se obtienen con una frecuencia de 30 minutos, lo que permitirá realizar un análisis continuo y detallado del gasto de agua mediante transpiración.

Estas medidas se complementarán, además, con el monitoreo continuo de la humedad edáfica asociada a cada individuo, cuyos datos, de frecuencia horaria, serán obtenidos utilizando sensores instalados bajo la proyección de la copa de cada uno de ellos. Gracias a esto, recopilaremos información de alta resolución acerca del balance hídrico de cada planta.

Del mismo modo, se realizarán muestreos periódicos en los que se registrarán variables ecofisiológicas, como potenciales hídricos de las hojas al alba y a mediodía, medidos con frecuencia estacional; y contenido en carbohidratos no estructurales (NSC), obtenido de forma cuatrimestral. Utilizando esta información se podrá inferir el nivel de estrés que está experimentando cada individuo y como afecta al balance de los carbohidratos de reserva (NSC).

Al mismo tiempo, se monitorizarán determinadas condiciones ambientales para evaluar su pa-



Foto 1. Instalación de un sensor HRM en un individuo de *Pinus halepensis*.

pel como motores de las variables anteriormente citadas. Para ello se utilizarán datos de sendas estaciones meteorológicas situadas en las inmediaciones de las zonas de estudio, en las cuales se está registrando en continuo la temperatura máxima y mínima, y humedad ambiental, velocidad y dirección del viento, presión atmosférica y volumen e intensidad de precipitación. Del mismo modo, dentro de cada zona de estudio se instalará un sensor de temperatura y humedad relativa (HOBO® pendant, Onset Computer Corporation, USA) con el fin de tener una referencia del efecto de la cubierta vegetal sobre estas variables.

## EXPERIENCIAS INICIALES y RESULTADOS PRELIMINARES

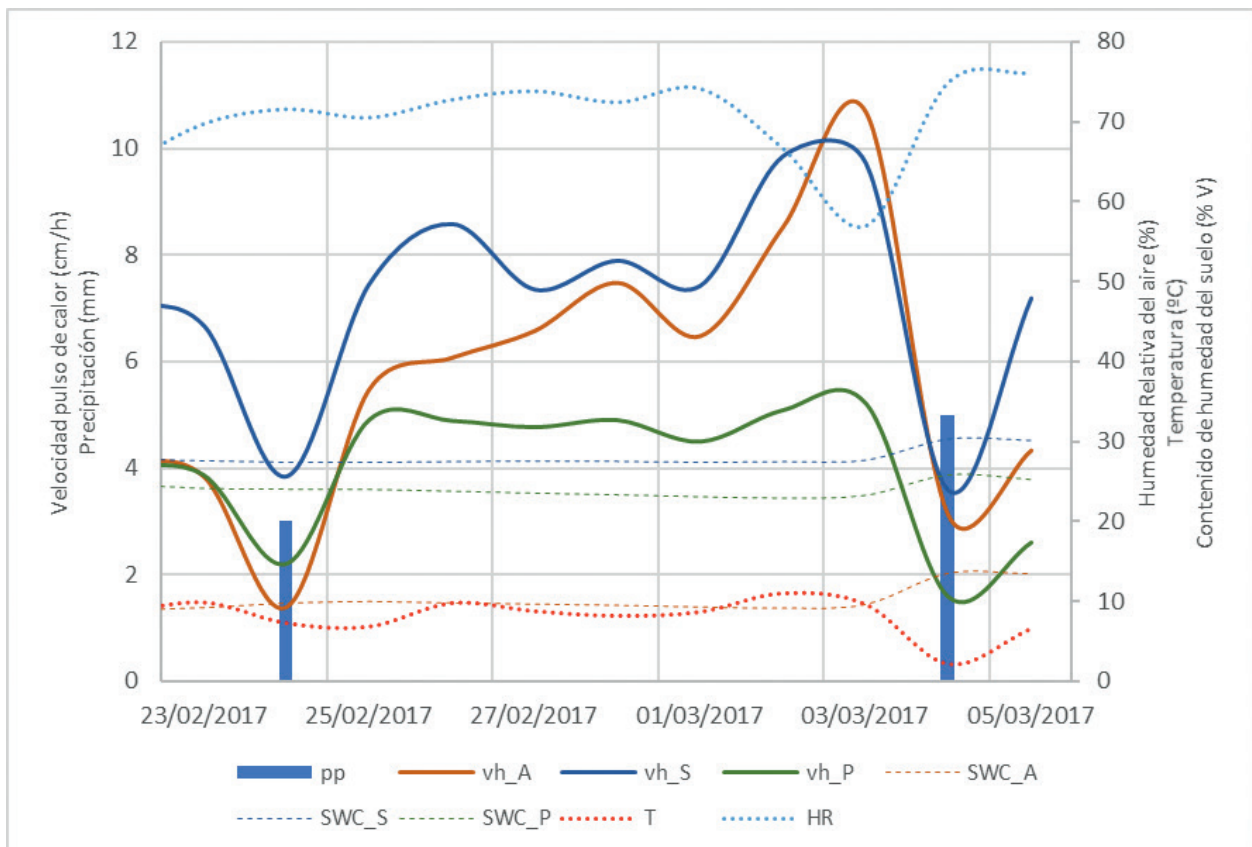
Las instalaciones necesarias para la puesta en marcha de la investigación en estos lugares se llevaron a cabo en febrero de 2017 en la estación experimental de Font Roja y comenzaron en mayo

de 2017 para la de Torretes. Actualmente la primera se encuentra ultimando sus fases de calibración, mientras que la segunda se completará en septiembre de este mismo año. Aun así, ya conta-

mos con lecturas registradas por los sensores de flujo de savia de ambas parcelas, lo que permite esbozar unos primeros resultados.

En la figura 4 se muestran los promedios diarios de las lecturas de velocidad de pulso de calor en la parcela de Font Roja, obtenidas durante sus primeras semanas de funcionamiento, junto con

las variables ambientales registradas en esas fechas. En esta figura se observa que los individuos sanos de *Quercus rotundifolia*, de forma general, transpiran más que los afectados por sequía, y estos, a su vez, que los pinos; al mismo tiempo que los sensores registran bajadas en sus lecturas tras cada episodio de precipitación.



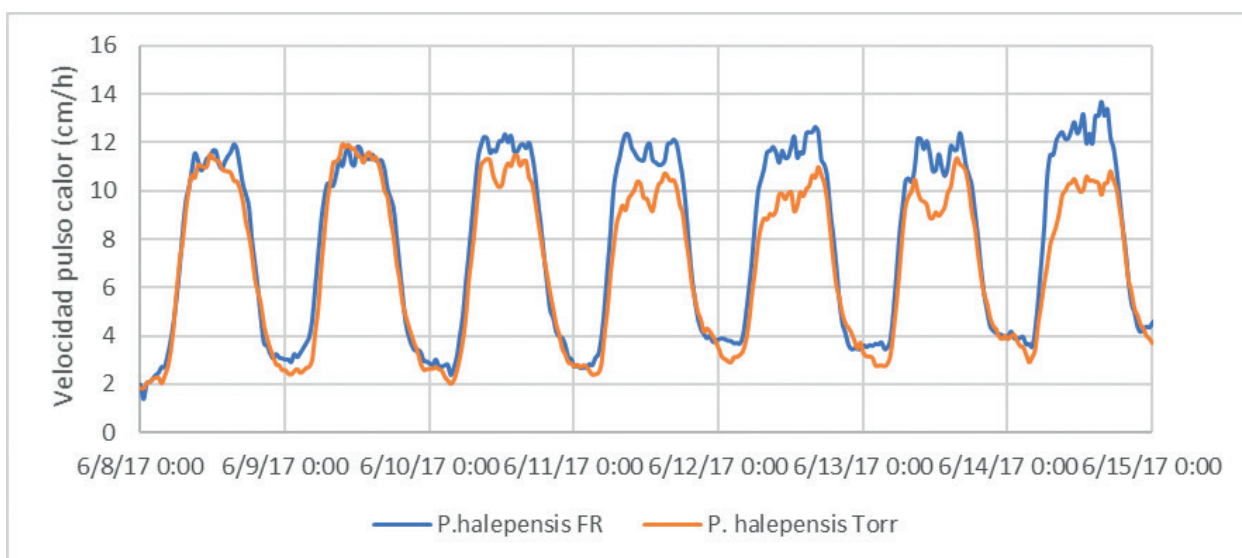
**Fig. 4.** Promedios diarios de la velocidad de pulso de calor (vh) por tipo de individuo (A: afectados por sequía, S: sanos, P: pinos) en la parcela de Font Roja. Además, se muestran los registros correspondientes de humedad relativa del aire (HR), temperatura (T), precipitación (pp) y contenido en humedad del suelo (SWC) para cada tipo de individuo.

En la figura 5 se contrastan las medidas de velocidad de pulso de calor de individuos de *Pinus halepensis* de ambas parcelas (Torretes y Font Roja), con una resolución temporal de media hora, correspondientes a la primera semana de funcionamiento de los sensores de la estación experimental de Torretes. Se observa que los registros son relativamente similares, aunque los

valores obtenidos en la parcela de Torretes son ligeramente más bajos, lo que podría estar originado por un mayor estrés ambiental causado por las condiciones de solana frente a la umbría de la estación de Font Roja.

Los resultados del proyecto ALTERACLIM permitirán el seguimiento, con alta precisión y reso-





**Fig. 5.** Respuesta típica de la velocidad de pulso de calor registrada por los sensores HRM durante la semana del 8 de junio de 2017 al 15 de junio de 2017, en la figura se muestra un individuo de *P.halepensis* de la estación de Font Roja y otro de la de Torretes.

lución temporal, del estado hídrico de las plantas y síntomas de decaimiento por sequía. Dado que se esperan nuevos eventos de sequía en los próximos años, además de un aumento de su frecuencia, este proyecto supone una oportunidad para conocer con mayor profundidad y con gran detalle el modo en el que se verá afectada la vegetación mediterránea tanto por dichas sequías como por el cambio climático.

Nuestros resultados también servirán para validar, calibrar y mejorar modelos que simulen el balance hídrico de los ecosistemas, por lo que también se incrementará la precisión de sus pre-

visiones bajo distintos escenarios climáticos y a diferentes escalas.

En definitiva, un mayor conocimiento acerca de cómo el cambio climático afectará a los ecosistemas mediterráneos constituirá información clave para los gestores del medio natural, ya que la anticipación a sus consecuencias permitirá la puesta en marcha de herramientas y actuaciones encaminadas a incrementar la resiliencia de las masas forestales y así conservar el valor y servicios de dichos espacios, como el Parque natural del Carrascal de la Font Roja.

## AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la Conselleria d'Agricultura, Medi Ambient, Canvi Climàtic i Desenvolupament Rural la autorización para trabajar en el parque, al personal del Parque Natural del Carrascal de la Font Roja y al de la Estación Biológica de Torretes su colaboración y facilitar las tareas durante la instalación del material en la zonas experimentales.

Este trabajo que se está desarrollando está financiado dentro del marco de los proyectos Alteraclim (CGL2015-69773-C2-1-P) y Survive-2 (CGL2015-69773-C2-2-P) con fondos del ministerio de Ciencia y Tecnología (MINECO/FEDER).

## BIBLIOGRAFÍA

- Allen, C. D., Macalady, A. K., Chenchouni, H., Bachelet, N., McDowell, N., Vennetier, M., Kitzberger, T., Rigling, A., Breshears, D. D., Hogg, E. H., Gonzalez, P., Fensham, R., Zhang, Z., Castro, J., Demidova, N., Lim, J., Allar, G., Running, S. W., Semerci, A., Cobb, N. (2010) A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *Forest Ecology and Management* 259: 660 – 684.
- Bonan, G. B. (2008) Forests and climate change: forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests. *Science* 320, 1444 – 1449.
- Burgess, S. S. O., Adams, M. A., Turner, N. C., Beverly, C. R., Ong, C. K., Khan, A. A. H., Bleby, T. M. (2001) An improved heat pulse method to measure low and reverse rates of sap flow in woody plants. *Tree Physiology* 21: 589 – 598.
- del Campo, A., Fernandes, T., Molina, A. (2014) Hydrology-oriented (adaptive) silviculture in a semiarid pine plantation: how much can be modified the water cycle through forest management? *Eur. J. For. Res.*, 1–16, <http://dx.doi.org/10.1007/s10342-014-0805-7>, ISSN: 1612-4669
- Fernandes, T. J., Del Campo, A. D., Herrera, R., & Molina, A. J. (2016) Simultaneous assessment, through sap flow and stable isotopes, of water use efficiency (WUE) in thinned pines shows improvement in growth, tree-climate sensitivity and WUE, but not in WUEi. *Forest Ecology and Management*, 361, 298-308.
- Forner, A., Aranda, I., Granier, A., Valladares, F. (2014) Differential impact of the most extreme drought event over the last half century on growth and sap flow in two coexisting Mediterranean trees. *Plant ecology* 215: 703 -719.
- Frank, D. C., Reichstein, M., Bahn, M., Thonicke, K., Frank, D., Mahecha, M. D., Smith, P., Van Der Velde, M., Vicca, S., Babst, F., Beer, Christian., Buchmann, N., Canadell, J. G., Ciais, P., Cramer, W., Ibrom, A., Miglietta, F., Poulter, B., Rammig, A., Seneviratne, S. I., Walz, A., Wattenbach, M., Zavala, M. A., Zscheischler, J. (2015) Effects of climate extremes on the terrestrial carbon cycle: concepts, processes and potential future impacts. *Global Change Biology*. Doi: 10.1111/gcb.12916.
- García de la Serrana, R., Vilagrosa, A., Alloza, J.A. (2015) Pine mortality in southeast Spain after an extreme dry and warm year: interactions among drought stress, carbohydrates and bark beetle attack. *Trees* 29: 1791 – 1804.
- García-Fayos, P. (2008). Interacciones entre la vegetación y la erosión hídrica. In F. Valladares (Ed.), *Ecología del bosque mediterráneo en un mundo cambiante*. 2nd ed., pp. 311–336. Madrid: Ministerio de Medio Ambiente, EGRAF S.A.
- Grace J. (2004) Understanding and managing the global carbon cycle. *Journal of Ecology* 92(2): 189 – 202.
- Greenwood, S., Ruiz-Benito, P., Martínez-Vilalta, J., Lloret, F., Kitzberger, T., Allen, C. D., Fensham, R., Laughlin, D. C., Kattge, J., Bönisch, G., Kraft, N. J. B., Jump, A. S. (2017) Tree mortality across biomes is promoted by drought intensity, lower Wood density and higher specific leaf area. *Ecology Letters* 20: 539 – 553.
- Grossiord, C., Forner, A., Gessler, A., Granier, A., Pollastrini, M., Valladares, F., Bonal, D. (2014) Influence of species interactions on transpiration of Mediterranean tree species during a summer drought. *European Journal of Forest Restoration*. doi: 10.1007/s10342-0857-8.
- Grossiord, C., Sevanto, S., Dawson, T. E., Adams, H. D., Collins, A. D., Dickman, L. T., Newman, B. D., Stockton, E. A., McDowell, N. G. (2016) Warming combined with more extreme precipitation regimes modifies the water sources used by trees. *New phytologist*. doi: 10.1111/nph.14192.
- IPCC (2013) Climate change 2013: the Physical Science Basis. In: Stocker TF, Quin D, Plattner GK, Tignor MMB, Allen SK, Boschung J, Nauels A, Xia Y, Bex V, Midgley PM (eds). Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, p 986.

- Juárez, M., Sánchez A., Jordá J.D., Sánchez J.J.** (2004). Diagnóstico del potencial nutritivo del suelo. Publicaciones de la Universidad de Alicante. 98 pp.
- McDowell, N. G., Allen C. D.** (2015) Darcy's law predicts widespread forest mortality under climate warming. *Nature climate Change* 5: 669 – 672.
- McDowell, N. G., Pockman, W. T., Alen, C. D. Breshears, D. D., Cobb, N., Kolb, T., Plaut, J., Sperry, A. W., Williams, D. G., Yezzer, E. A.** (2008) Mechanisms of plant survival and mortality during drought: why do some plants survive while others succumb to drought? *New phytologist* 178: 719 – 739.
- McDowell, N. G., Sevanto, S.** (2010) The mechanisms of carbon starvation: how, when or does it even occur at all? *New phytologist* 186: 264 – 266.
- Peñuelas, J., Ogaya, R., Boada, M., Jump, A. S.** (2007) Migration, invasion and decline: changes in recruitment and forest structure in a warming-linked shift of European beech forest in Catalonia (NE Spain). *Ecography* 30: 829 – 837.
- Poyatos, R., Agudé, D., Gaiano, L., Mencuccini, M., Martínez-Vilalta, J.** (2013) Drought-induced defoliation and long periods of near-zero gas Exchange play a key role in accentuating metabolic decline of Scots pine. *New phytologist* 200: 388 – 401.
- Tague, C. L., McDowell, N. G., Allen, C. D.** (2013) An integrated model of environmental effects on growth, carbohydrate balance, and mortality of *Pinus ponderosa* forests in the southern Rocky Mountains. *PLOS ONE* 8 (11): e80286. doi:10.1371/journal.pone.0080286.
- Williams A. P., Allen, C. D., Macalady, A. K., Griffin, D., Woodhouse, C. A., Meko, D. M., Swetnam, T. W., Rauscher, S. A., Seager, R., Mayer-Grissino, H. D., Dean, S. J., Cook, E. R., Gangodagamage, C., Cai, M., McDowell, N. G.** (2012) Temperature as a potent driver of regional forest drought stress and tree mortality. *Nature climate change* 3: 292 – 297.

