

#### Cómo citar este artículo:

José Manuel Ávila *et al.* “Consecuencias del decaimiento del alcornoque para el funcionamiento del ecosistema en el Campo de Gibraltar”. *Almoraima. Revista de Estudios Campogibraltareses*, 49, diciembre 2018. Algeciras. Instituto de Estudios Campogibraltareses, pp. 11-23.

Recibido: septiembre de 2017

Aceptado: octubre de 2017

# CONSECUENCIAS DEL DECAIMIENTO DEL ALCORNOQUE PARA EL FUNCIONAMIENTO DEL ECOSISTEMA EN EL CAMPO DE GIBRALTAR

José Manuel Ávila / Licenciado en Ciencias Ambientales

Beatriz Ibáñez / Doctora por la Universidad Pablo de Olavide

Antonio Gallardo / Catedrático de Ecología Universidad Pablo de Olavide

Lorena Gómez-Aparicio / Investigadora en el Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología (IRNAS-CSIC)

## RESUMEN

En las últimas décadas se ha detectado un incremento en el decaimiento de los *Quercus* perennifolios (*Quercus suber* y *Quercus ilex*) en bosques de la cuenca mediterránea asociados a diversos factores de cambio global como el cambio climático o las especies invasoras. En los bosques del sur de la península ibérica, el decaimiento y muerte de estos árboles se ha asociado a la presencia de un agresivo patógeno invasor, *Phytophthora cinnamomi*. En este trabajo se presentan resultados de estudios de campo y de laboratorio sobre el efecto del decaimiento en la ecofisiología del alcornoque (*Quercus suber*) y en los ciclos de nutrientes y la comunidad microbiana del suelo, así como la interacción de estos impactos con el cambio climático. Los alcornoques afectados por decaimiento mostraron una incapacidad para incrementar la eficiencia del uso del agua, lo que muestra una elevada vulnerabilidad del árbol al decaimiento provocado por *Phytophthora cinnamomi*. La defoliación y muerte de los árboles conllevó una importante alteración de los ciclos de nutrientes, en ocasiones provocando el descenso de nutrientes limitantes como el nitrógeno y el fósforo. Además, el decaimiento provocado por el patógeno podría interactuar con el futuro incremento de las temperaturas y de las sequías predicho para la zona de estudio, lo que provocaría reducciones aún mayores de la disponibilidad de nutrientes en estos bosques. En resumen, este trabajo pretende destacar las importantes consecuencias que tiene el decaimiento de alcornoques para el funcionamiento del ecosistema, problema que puede ser agravado en el futuro como consecuencia del cambio climático.

**Palabras clave:** ciclos biogeoquímicos, decaimiento forestal, funcionamiento del ecosistema, mortalidad de árboles.

## ABSTRACT

In the last decades an increment in the decline of evergreen *Quercus* species (*Quercus suber* and *Quercus ilex*) has been detected in forests of the Mediterranean Basin. The decline of these species has been associated to global change factors such as climate change and invasive species. In the forests of southern Iberian Peninsula, the decline and death of evergreen *Quercus* trees has been related to the aggressive invasive pathogen *Phytophthora cinnamomi*. This work shows the results of field and lab studies about the effect of the decline on cork oak (*Q. suber*) ecophysiology and on nutrient cycles and soil microbial community, including interactions of these impacts with predicted climate change. Declining cork oaks were not able to increase water use efficiency, showing a high vulnerability of *Q. suber* to the *P. cinnamomi*-induced decline. The defoliation and death of trees led to important changes on nutrient cycles, reducing limiting nutrients such as nitrogen and phosphorus. Moreover, our results show that the pathogen-induced decline could interact with predicted warming and drought, leading to even stronger reductions on nutrient availability in these forests. In summary, this work aims to highlight the important consequences of cork oak decline on ecosystem functioning, which can be exacerbated in the future due to climate change.

**Key Words:** biogeochemical cycles, forest decline, ecosystem functioning, tree mortality.

## 1. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas se ha detectado un incremento en las tasas de mortalidad de árboles en bosques de todo el mundo (Allen *et al.*, 2010, Carnicer *et al.*, 2011). Las causas de este fenómeno son complejas y están frecuentemente asociadas a agentes del cambio global como el incremento de las temperaturas y las sequías, los patógenos y plagas invasoras o las interacciones entre estos factores (Martínez-Vilalta *et al.*, 2012). El proceso de defoliación y mortalidad de los árboles puede desencadenar importantes impactos para el funcionamiento del ecosistema, provocando una reducción de la producción primaria, alteraciones en la dinámica de plántulas y micorrizas y cambios en la circulación de nutrientes en el bosque (Lovett *et al.*, 2006, Anderegg *et al.*, 2013, Ibáñez *et al.*, 2015a, Ibáñez *et al.*, 2015b). Hasta el momento, muchos trabajos se han centrado en estudiar las causas de estos fenómenos de mortalidad, sin embargo, todavía existen muchas incertidumbres sobre el impacto que provocarían sobre el funcionamiento del bosque.

En este contexto de incremento de la mortalidad, los bosques de encinas (*Quercus ilex*) y alcornoques (*Quercus suber*), junto con aquellos dominados por otras especies de quercíneas en Europa y Norte América, han sido fuertemente afectados por este fenómeno. Los árboles del género *Quercus* dominantes en estos bosques son un elemento estructural muy importante y mantienen funciones y servicios ecosistémicos tales como el incremento de la biodiversidad, la protección del suelo o la provisión de recursos y de servicios culturales (Marañón *et al.*, 2012). Concretamente el alcornoque es una especie de gran importancia ecológica, económica y social en el sur de la península ibérica. En el Parque Natural de Los Alcornocales, situado en esta región, el alcornoque está siendo severamente afectado por un incremento de la mortalidad mediante un fenómeno comúnmente conocido como “la seca” y cuyo principal agente es un patógeno del suelo invasor denominado *Phytophthora cinnamomi* (Brasier, 1992, Gómez-Aparicio *et al.*, 2012). Además, otros factores abióticos como el clima y las características del suelo pueden modular los efectos del patógeno sobre la salud de los árboles (Camilo-Alves *et al.*, 2013, Brasier, 1996).

Además del efecto de los patógenos invasores, los bosques afectados por “la seca” también tendrán que hacer frente al fenómeno de cambio climático. La cuenca mediterránea está sufriendo un descenso de las precipitaciones y un fuerte incremento de la temperatura y de la severidad de las sequías en los últimos veinte años (Peñuelas *et al.*, 2002, Vicente-Serrano *et al.*, 2014). Además, los modelos climáticos predicen un incremento de la aridez para las próximas décadas en esta región (Wetherald y Manabe, 2002, Planton *et al.*, 2012). La interacción del efecto de los patógenos con un incremento de la temperatura y la aridez podría provocar efectos sobre el funcionamiento del ecosistema de forma hasta ahora impredecible. A pesar de que muchos estudios se han centrado en analizar el impacto del cambio climático en los ecosistemas, hasta el momento no se ha estudiado experimentalmente el efecto del cambio climático en el funcionamiento del bosque en sistemas afectados por “la seca”, lo que nos impide predecir el impacto de estos fenómenos a futuro.

En este trabajo se presentan los resultados de varios estudios realizados en el Parque Natural de Los Alcornocales dirigidos hacia la obtención de un conocimiento científico sólido que permita conocer en profundidad, interpretar y pronosticar el funcionamiento del bosque mediterráneo afectado por “la seca”, contribuyendo a su conservación, gestión y restauración en el escenario actual de cambio global. Para ello se establece como objetivo general analizar las consecuencias para los principales flujos de nutrientes (carbono, nitrógeno y fósforo), de cambios en la estructura y composición de bosques de alcornoques afectados por el fenómeno de “la seca”. Se han establecido los siguientes objetivos específicos:

- 1) Analizar la vulnerabilidad de los alcornoques a “la seca” a través del estudio de la respuesta fisiológica de individuos afectados, en términos de eficiencia del uso del agua y el crecimiento secundario.
- 2) Analizar el impacto de “la seca” en el funcionamiento del suelo. Concretamente se explorará el impacto sobre la respiración del suelo y la disponibilidad de nitrógeno y fósforo.
- 3) Analizar la resistencia de los suelos bajo árboles con diferente estado de salud ante escenarios futuros de cambio climático.

## 2. MATERIAL Y MÉTODOS

### 2.1. Área de estudio

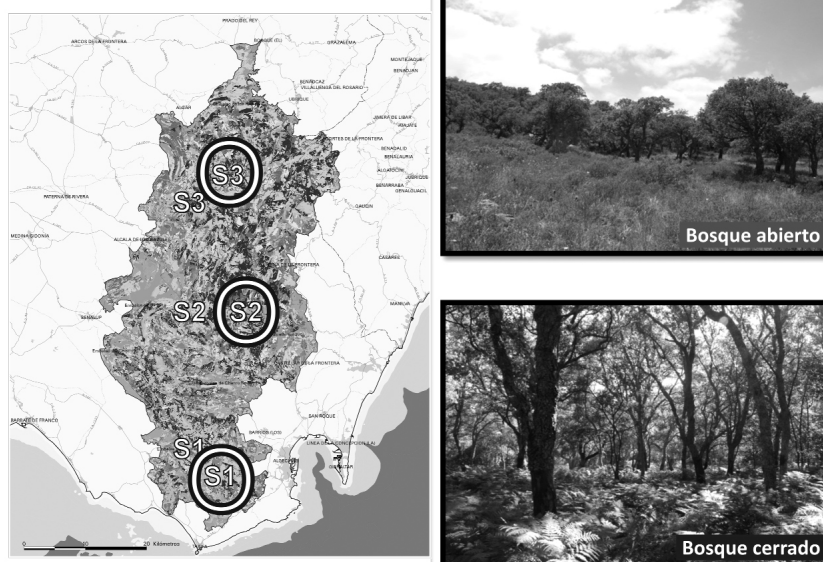
Este trabajo se ha llevado a cabo en el Parque Natural de Los Alcornocales, localizado en las provincias de Cádiz y Málaga. El Parque Natural de Los Alcornocales se encuentra situado en la zona biogeográfica Bético-Rifeña, que ha sido considerada como un punto muy importante de biodiversidad de la cuenca mediterránea (Medail y Quezel, 1997). El clima en el Parque está clasificado como mediterráneo. La precipitación varía entre 530 y 1180 mm (Torres, 1995) dependiendo de la orografía y la proximidad al océano. Los inviernos son fríos y húmedos y los veranos secos y calurosos, con temperaturas medias anuales entre 14.6°C y 18.4°C (Pérez-Ramos, 2006). La vegetación está dominada por formaciones boscosas de alcornoque (*Quercus suber*), localizadas fundamentalmente sobre los sustratos ácidos de las areniscas del Aljibe en altitudes comprendidas entre los 100-700 m. En los fondos de valle y en laderas más frescas y umbrías, el alcornoque se entremezcla con el quejigo (*Quercus canariensis*), apareciendo bosques cerrados con un rico sotobosque de matorral noble mediterráneo (*Agracejo-Phillyrea latifolia*, *madroño-Arbutus unedo*, *brezo-Erica arborea*). En las zonas bajas con predominio de suelos arcillosos, el alcornoque aparece formando bosques abiertos con el acebuche (*Olea europaea var. sylvestris*) y matorral como el lentisco (*Pistacia lentiscus*) y el majuelo (*Crataegus monogyna*).

## 2.1. Diseño del muestreo y métodos

Se seleccionaron 6 parcelas de 1 hectárea con síntomas de decaimiento del arbolado cubriendo el mayor gradiente de condiciones climáticas y edáficas posibles dentro del Parque Natural. Las parcelas se encuentran en los términos municipales de Tarifa, Algeciras, Jimena de la Frontera, Benalup y Alcalá de los Gazules. Tres parcelas se situaron en bosque abierto en el que se entremezclan alcornoque y acebuche y las otras tres parcelas en bosque cerrado, en el que se entremezclan alcornoque y quejigo (Ilustración 1).



### Parque Natural Los Alcornocales



**Ilustración nº 1.** Mapa de localización del P. N. Los Alcornocales y las parcelas de estudio. Se muestran imágenes del bosque abierto y del bosque cerrado (rodeado con un círculo en el mapa). Autora de las fotografías: Beatriz Ibáñez.

Para el primer objetivo, se seleccionaron 5 individuos de alcornoque sanos y 5 defoliados en cada una de las parcelas de estudio. De cada árbol se tomaron muestras de 3 ramas superiores de aproximadamente 5 cm de diámetro (12-15 años) con orientación sur y de la parte externa de la copa, a 4-6 m de altura ( $n = 180$  ramas muestreadas). De cada rama se analizó su crecimiento anual, así como se determinó la eficiencia del uso del agua a partir de la medida de la relación isotópica  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  (McCarroll y Loader, 2004). La composición isotópica de las muestras se analizó en el laboratorio Stable Isotope Facility de la Universidad de California, en Davis.

Para el segundo objetivo, en el centro de cada una de las parcelas experimentales de 1 ha se estableció una sub-parcela de  $70 \times 70 \text{ m}^2$  que se dividió en 49 cuadrados de  $10 \times 10 \text{ m}^2$ . En cada uno de los cuadrados se centró un cuadrado adicional de  $1 \times 1 \text{ m}^2$ , donde se realizaron todas las mediciones de los procesos biogeoquímicos del suelo ( $n = 249$  muestras). Concretamente se seleccionaron variables que están relacionados con los ciclos del carbono (respiración del suelo), nitrógeno y fósforo (disponibilidad). En cada cuadrado de muestreo se analizó la respiración del suelo, mediante el método de trampa de álcali (Singh y Gupta, 1977), así como la disponibilidad de nitrógeno y fósforo *in situ*, mediante resinas de intercambio iónico –root simulators– siguiendo la metodología empleada en Durán *et al.*, (2008). Paralelamente, y para poder relacionar el proceso de defoliación y muerte del alcornoque con las variables edáficas, se mapeó mediante una estación total TP-408, la posición en el espacio de todos los alcornoques adultos en un radio de 15 metros de cada punto de muestreo. Además, se anotó su DBH -diámetro a la altura del pecho- y su estado de defoliación (sano, defoliado y muerto).

Para el tercer objetivo, se tomaron muestras de suelo bajo 5 individuos de alcornoques de cada estado de defoliación (sanos, desfoliados y muertos) en una de las parcelas de bosque abierto y en otra de bosque cerrado ( $n = 30$  muestras). Estas muestras, se transportaron al laboratorio donde se incubaron a distintas condiciones de temperatura y humedad del suelo simulando distintos escenarios de cambio global. Concretamente se analizaron escenarios actuales (temperatura media  $16^\circ\text{C}$ , humedad del suelo 40% de la capacidad de retención del agua), así como las predicciones de modelos climáticos más comúnmente utilizados en dos escenarios: 2050 –temperatura media  $19^\circ\text{C}$  y humedad del suelo 32% de la capacidad de retención del agua– y 2100 –temperatura media  $22^\circ\text{C}$  y humedad del suelo 15% de la capacidad de retención del agua– (Manabe *et al.*, 2004, IPCC, 2007, IPCC, 2013). Los suelos se incubaron durante 4 semanas, controlando la humedad semanalmente. Para cada una de las muestras se estimó la cantidad de nitrógeno disponible (Durán *et al.*, 2008) y el fósforo lábil (Kouno *et al.*, 1995), además se realizó una medida semanal de la mineralización de la materia orgánica mediante el seguimiento de la respiración del suelo siguiendo un método colorimétrico (García-Palacios *et al.*, 2013). Para evaluar cómo la mortalidad provocada por “la seca” afecta a la resistencia de los suelos ante los escenarios de cambio climático, se calculó un índice de resistencia (Orwin y Wardle, 2004) para las variables estudiadas:

$$RS : 2 |D_0| / (C_0 + |D_0|)$$

Donde  $D_0$  es la diferencia entre el control ( $C_0$ ) y el suelo alterado al final de la perturbación. Para calcular este índice, se consideraron los valores promedios actuales como control -temperatura  $16^\circ\text{C}$  y humedad 40% de la capacidad de retención hídrica- y los 2 escenarios anteriormente descritos: 2050 y 2100. Este índice de resistencia toma valores entre -1 y +1, de tal forma que un valor de -1 muestra menos resistencia y un valor de +1 muestra una mayor resistencia.



## 2.2. Análisis estadístico

Se comparó la eficiencia del uso del agua y el crecimiento secundario de los individuos de alcornoque sanos y defoliados. Para ello se utilizaron modelos lineales mixtos (LMM), usando el factor parcela como factor aleatorio en el modelo. Los modelos se hicieron incluyendo todos los árboles, independientemente del tipo de bosque. Además, se testó usando LMM si existían diferencias significativas en las variables fisiológicas en función del tipo de bosque donde crecía el árbol (bosque abierto o bosque cerrado).

En el segundo objetivo se evaluó el efecto del estado de salud de los alcornoques –sano, defoliado y muerto– en las variables edáficas usando modelos de vecindad donde las estimaciones se realizaron mediante métodos de máxima verosimilitud (Canham y Uriarte, 2006, Gómez-Aparicio *et al.*, 2013). Mediante estos modelos, medidas de procesos del ecosistema –como por ejemplo la respiración del suelo o la disponibilidad de nutrientes– son analizadas en términos de la distribución espacial de los árboles vecinos. Estos modelos de vecindad asumen que la distribución espacial de los individuos de diferentes especies –en nuestro caso diferentes estados de salud– regulan la variación espacial de las propiedades del ecosistema. El efecto de los árboles sobre las variables edáficas se midió usando un índice de vecindad –NI, del inglés Neighbourhood Index–. Este índice considera que el efecto de los árboles sobre las variables del suelo es directamente proporcional al tamaño del árbol vecino (DBH) e inversamente proporcional a la distancia que separa el árbol al punto de muestreo. Se considera como árbol vecino a todo aquel que se encuentre en un radio de 15 metros del punto de muestreo:

$$NI = \sum_{i=0}^s \sum_{j=0}^n \lambda_i \frac{dbh_{ij}^{\alpha}}{distancia_{ij}^{\beta}}$$

En esta fórmula, NI es el índice de vecindad que cuantifica el efecto neto de los  $j= 1, \dots, n$  vecinos de los  $i= 1, \dots, s$ , estados de salud en la variable del suelo,  $\lambda$  es un coeficiente per capita para cada estado de salud que varía entre -1 y 1,  $dbh$  es el diámetro a la altura del pecho del árbol,  $distancia$  es la distancia entre el árbol vecino y el punto de muestreo, y  $\alpha$  y  $\beta$  son parámetros que estiman la intensidad del efecto del tamaño del árbol y la distancia, respectivamente. Para determinar estadísticamente el efecto de la vecindad sobre las variables edáficas, se compararon modelos que incluían el efecto de los árboles sobre éstas variables con modelos nulos que no incluyen ningún efecto de los árboles. Se usó el criterio de información de Akaike (AIC) para elegir entre modelos alternativos (Burnham y Anderson, 2002), así como medidas estándar de bondad del ajuste ( $R^2$ ) para evaluar los mejores modelos.

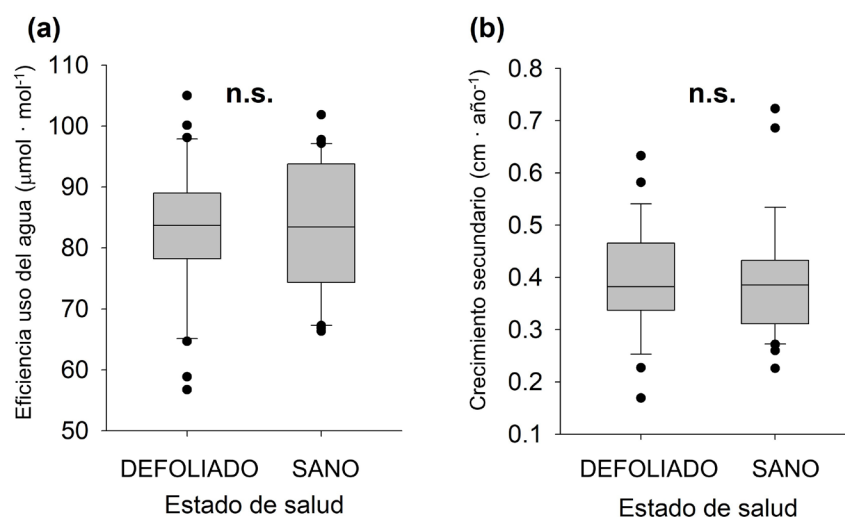
Para el tercer objetivo se usaron unos modelos lineales generalizados con una familia de distribución gaussiana y una función de vínculo identidad. Debido a la naturaleza acotada del índice, los datos fueron transformados mediante raíz cúbica o quinta cuando fue necesario, para poder cumplir con las asunciones del modelo (Cox, 2011). Escenario y estado de salud fueron las variables explicativas del modelo. La selección del modelo se realizó mediante un procedimiento de selección por pasos –backward stepwise– usando AIC. Para determinar las diferencias entre estados de salud y escenarios se usaron comparaciones múltiples usando el test de Tukey (Crawley, 2007).

Todos los análisis estadísticos se realizaron usando el software R 3.1.1 y las librerías nlme, likelihood y MuMIn. Los gráficos se realizaron usando Sigmaplot v12.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1. Efecto de “la seca” sobre la eficiencia del uso del agua y el crecimiento secundario de los alcornoques

Los modelos no mostraron ninguna diferencia entre los árboles sanos y defoliados, ni en términos de eficiencia del uso del agua (LMM  $F = 0.086$ ,  $P = 0.771$ ) ni de crecimiento secundario (LMM  $F = 0.187$ ,  $P = 0.667$ , Ilustración 2). Por ello, nuestros resultados sugieren un desacople entre los síntomas de defoliación asociados a “la seca” y la respuesta fisiológica de los árboles. Se podría esperar que alcornoques defoliados sometidos a estrés pudieran mostrar una respuesta fisiológica acoplada al proceso de defoliación. Los árboles de ecosistemas mediterráneos usualmente responden al estrés hídrico cerrando sus estomas para limitar la pérdida de agua e incrementar la eficiencia en el uso del agua (Serrano y Peñuelas, 2005). Este mismo mecanismo también podría esperarse en árboles afectados por patógenos del suelo que afectan a las raíces y que, por tanto, someten al árbol a estrés hídrico, como es el caso de *Phytophthora cinnamomi* (Fleischmann *et al.*, 2002). Sin embargo, aunque los árboles nativos de ecosistemas limitados por agua, como el ecosistema mediterráneo, son capaces de responder al estrés hídrico, su plasticidad fenotípica podría verse excedida ante determinadas circunstancias de intensas sequías o alteraciones bióticas (Sangüesa-Barreda *et al.*, 2013, Galiano *et al.*, 2012). Asimismo, podría esperarse un descenso en el crecimiento secundario de las ramas (Solla *et al.*, 2009). Sin embargo, en este trabajo se ha detectado que ramas de árboles defoliados y sanos crecen a una tasa similar, independientemente de su estado de salud. Estos resultados demuestran que el alcornoque podría ser incapaz de mitigar el efecto negativo de un descenso en la disponibilidad hídrica provocada por el patógeno *Phytophthora cinnamomi* a través del cierre de los estomas, lo que se traduce en la defoliación y muerte del árbol.



**Ilustración n° 2.** Eficiencia del uso del agua (a) y crecimiento secundario de las ramas (b) en alcornoques sanos y defoliados.  $N = 30$  muestras. n.s. = diferencias no significativas ( $p > 0.05$ ). Cada diagrama de caja representa la mediana, los rangos intercuartílicos y los bigotes (1'5 veces el rango intercuartílico). Los puntos representan los datos extremos.

A pesar de esta falta de respuesta fisiológica ante “la seca”, sí se detectó que la eficiencia del uso del agua de los alcornoques varió según el bosque de procedencia, con mayores valores en bosque abierto que en bosque cerrado (LMM  $F = 52.035$ ,  $p = 0.002$ ). Los alcornoques en bosque cerrado mostraron un 20% de eficiencia en el uso del agua superior a los alcornoques en bosque cerrado. Sin embargo, el crecimiento secundario de las ramas fue similar entre los distintos tipos de bosque (LMM  $F = 0.003$ ,  $p = 0.960$ ). Los bosques abiertos están caracterizados por una menor precipitación, mientras que los bosques cerrados suelen presentar una mayor precipitación y frecuentes nieblas, incluso durante el verano, lo que reduce significativamente el estrés hídrico de los árboles (Ávila *et al.*, 2017, Ojeda *et al.*, 2000). Estas diferencias entre bosques podrían explicar las diferencias en la eficiencia del uso del agua detectadas entre árboles de bosque abierto y bosque cerrado. Estos resultados demuestran que el alcornoque puede ajustar eficientemente la apertura de las estomas en relación a la disponibilidad de agua local. Sin embargo, a pesar de mostrar esta elevada capacidad para adaptar su eficiencia del uso del agua a la disponibilidad de ésta, los alcornoques no parecen ser capaces de modificar este parámetro ante el fenómeno de “la seca”, lo que demuestra su elevada vulnerabilidad ante este fenómeno.

### 3.2. El impacto de “la seca” en el funcionamiento del suelo

Este trabajo muestra cómo “la seca” conlleva importantes alteraciones en los ciclos biogeoquímicos en el Parque Natural Los Alcornocales. Los modelos analizados mostraron una fuerte concordancia especial entre la distribución y estado de salud de los alcornoques y las variables estudiadas (respiración del suelo y disponibilidad de nutrientes). Sin embargo, no se detectaron efectos de la defoliación y mortalidad de los alcornoques con la diversidad funcional (Ilustración 3).

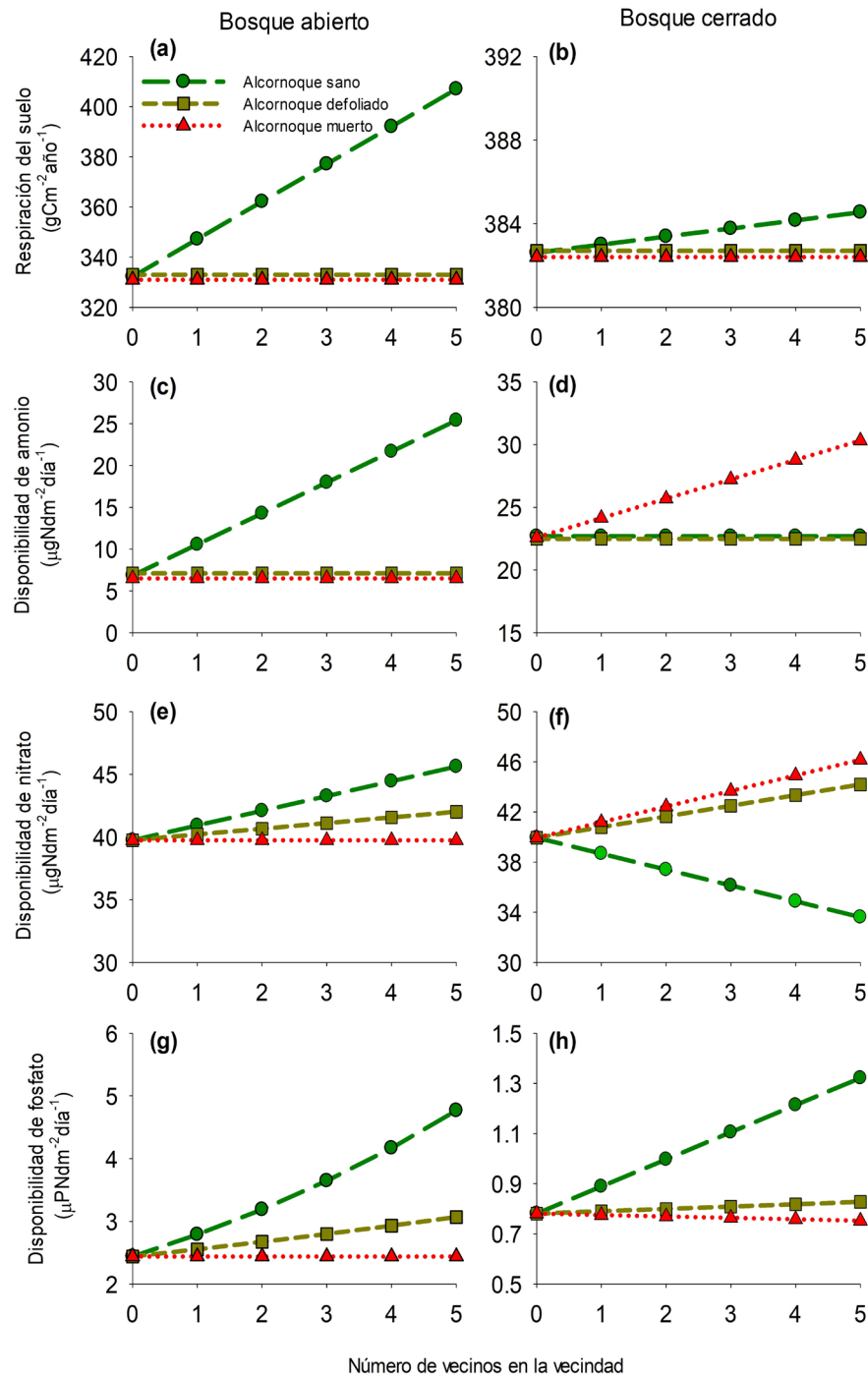
Las vecindades dominadas por alcornoques sanos tenían mayores tasas de respiración que aquellas dominadas por alcornoques defoliados o muertos (Ilustración 3). Este descenso de la respiración en árboles afectados por “la seca” podría estar relacionado con un descenso en la respiración de raíces –y la rizosfera asociada– en árboles afectados. Descensos similares han sido detectado en experimentos realizados simulando el ataque de patógenos –girdling experiments– (Högberg y Read, 2006, Levy-Varon *et al.*, 2012).

“La seca” también provocó alteraciones en los ciclos de nitrógeno y fósforo, aunque los impactos sobre el fósforo fueron de mayor magnitud. Las vecindades dominadas por árboles sanos tenían hasta un 50% más de fósforo disponible que aquellas dominadas por alcornoques muertos (Ilustración 3). Estas reducciones en el fósforo son de gran importancia en estos bosques, ya que se trata de un nutriente limitante y podría afectar a funciones ecosistémicas tales como la actividad de microorganismos del suelo, el crecimiento de los árboles o el crecimiento de las plántulas. Los efectos de árboles defoliados y muertos sobre la disponibilidad de nitrógeno –amonio y nitrato– fueron más complejos y variaron entre bosques. En bosque abierto, la disponibilidad de nitrógeno fue menor en vecindades dominadas por árboles defoliados y muertos que en aquellas dominadas por alcornoques sanos. Sin embargo, en bosque cerrado, el patrón detectado fue el opuesto. Estudios previos han demostrado un descenso del nitrógeno tras el ataque de árboles por insectos o en casos de mortalidad asociada a sequía (Wang *et al.*, 2012, Clow *et al.*, 2011). Sin embargo, los cambios en las condiciones microclimáticas provocados por la mortalidad y que pudieron diferir entre tipos de bosque, podrían haber provocado diferente efecto de “la seca” en función del tipo de bosque estudiado (Ávila *et al.*, 2016).

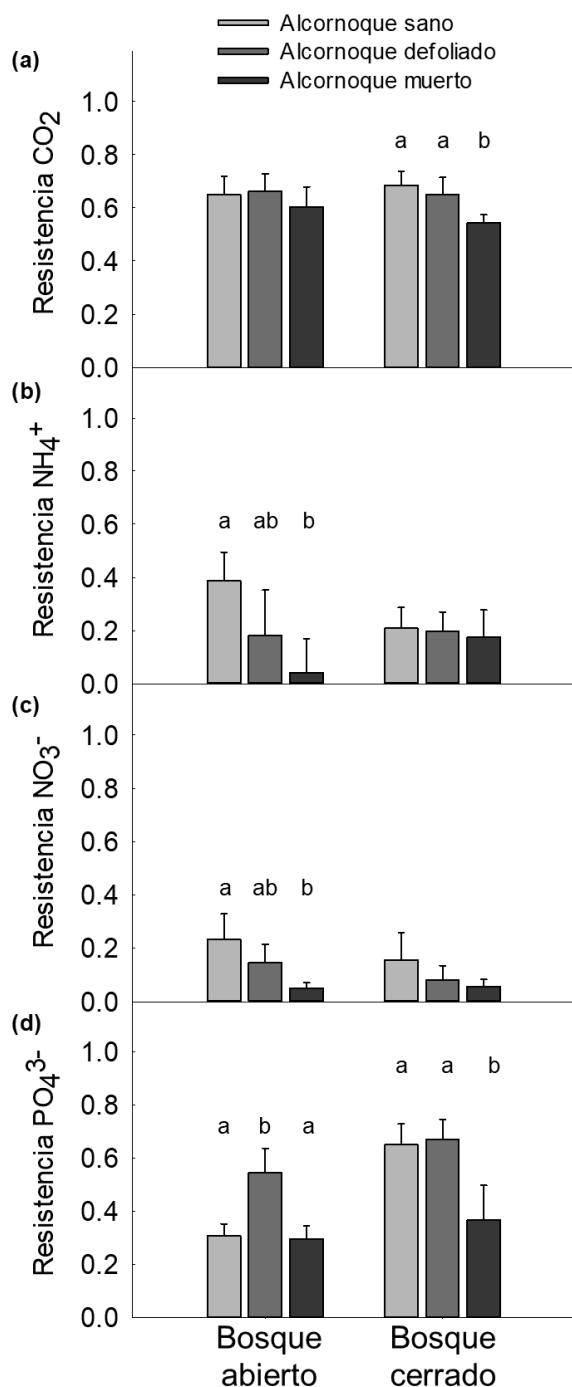


CONSECUENCIAS DEL DECAIMIENTO DEL ALCORNOCAL PARA EL FUNCIONAMIENTO DEL ECOSISTEMA EN EL CAMPO DE GIBRALTAR

José Manuel Ávila *et al.*



**Ilustración n° 3.** Panel que muestra los efectos predichos de la variación en la cantidad e identidad de los árboles en la vecindad sobre la respiración del suelo (a,b) y la disponibilidad de amonio (c,d), nitrato (e,f) y fosfato (g,h) en bosque abierto y cerrado. En estas figuras se representa cómo variaría la variable del suelo al incrementar el número de alcornoques sanos, muertos o defoliados en la vecindad. Las predicciones se han hecho usando los parámetros de los mejores modelos y considerándose árboles de tamaño 30 cm de DBH y a una distancia de 2 metros del punto de muestreo. Se muestra las diferencias en el criterio de información de Akaike (AIC) entre el mejor modelo y el modelo nulo, es decir, que no considera el efecto de los alcornoques, así como la bondad del ajuste (R<sup>2</sup>).



### 3.3. Efecto de la seca en la resistencia de los suelos a escenarios futuros de cambio climático

Este trabajo muestra cómo el efecto de “la seca” interacciona con el efecto del cambio climático para alterar el funcionamiento del suelo. Los suelos bajo árboles defoliados y muertos mostraron una menor resistencia a cambiar la respiración del suelo y la disponibilidad de nutriente ante los escenarios predichos para 2050 y 2100 que los suelos bajo árboles sanos (Ilustración 4). Los modelos mostraron diferencias significativas en la resistencia a cambios en la disponibilidad de nitrato y fosfato en el bosque abierto y en la respiración en el bosque cerrado. También se detectaron diferencias marginalmente significativas en los índices de resistencia entre árboles con distinto estado de salud para amonio en el bosque abierto y fosfato en el bosque cerrado. La mayor resistencia encontrada en suelos bajo árboles sanos podría ser consecuencia de una elevada estabilidad de los suelos en estos bosques debido a que están adaptados a las condiciones particulares de los ecosistemas mediterráneos (Curiel Yuste *et al.*, 2014). Las comunidades microbianas podrían estar adaptadas a las condiciones de altas temperaturas y sequía que ocurren durante el verano, lo que podría provocar una mayor resistencia de los procesos ecosistémicos ante futuros escenarios de mayor aridez. Sin embargo, el proceso de “la seca” podría provocar cambios en la diversidad y/o funcionamiento de la comunidad microbiana del suelo, como se ha detectado en otros bosques afectados por plagas o patógenos (Stursova *et al.*, 2014, Cai *et al.*, 2010). Esta alteración en las comunidades microbianas podría alterar la resistencia de los suelos a las futuras condiciones climáticas.

**Ilustración nº 4.** Cambios en el índice de resistencia para la respiración del suelo (a) y la disponibilidad de amonio (b), nitrato (c) y fosfato (d) ante los cambios predichos en el clima en suelos bajo alcornoques sanos, defoliados y muertos en bosque abierto y cerrado. Los datos mostrados son medias y error estándar (n=10). Los datos se agruparon para los dos escenarios de cambio climático -es decir, 2050 y 2100- debido a que no se detectaron diferencias significativas en la interacción entre las variables escenario y tipo de suelo, es decir, suelo bajo árboles sanos, defoliados y muertos. Las letras minúsculas indican diferencias significativas en los índices de resistencia entre los estados de salud del alcornoque ( $p < 0.05$ ).

### 3.4. Conclusiones

Los resultados de este trabajo demuestran que “la seca” provoca cambios importantes en el funcionamiento del bosque. Por un lado, este trabajo muestra la elevada vulnerabilidad del alcornoque ante el fenómeno de “la seca”. Aunque el alcornoque ha mostrado una gran capacidad para ajustar su fisiología a las condiciones hídricas locales, la respuesta que mostraron los árboles defoliados no fue suficiente para superar el estrés asociado a “la seca”. Además, la defoliación y mortalidad asociada a este fenómeno provocó impactos en los ciclos de carbono, nitrógeno y fósforo del bosque lo cual, a su vez, podría afectar a otros procesos ecosistémicos. Finalmente, este trabajo ha mostrado cómo el impacto de “la seca” sobre los procesos del suelo podría verse incrementado por las condiciones futuras asociadas al cambio climático, ya que este fenómeno altera la resistencia de procesos del suelo ante las condiciones futuras de incremento de temperatura y descensos de la humedad del suelo. Los resultados de este trabajo son de especial relevancia ya que los efectos negativos asociados a este fenómeno se podrían incrementar en el futuro más próximo debido al efecto del incremento de las temperaturas en la actividad del patógeno y a su expansión en el territorio.

### 4. AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al director y técnicos del Parque Natural Los Alcornocales por el apoyo para llevar a cabo el trabajo de campo. También, a todos los que han colaborado tanto en los trabajos de campo como de laboratorio. El presente estudio ha estado financiado por los proyectos INTERBOS y RETROBOS del Ministerio de Ciencia e Innovación y una beca-contrato FPU concedida por el Ministerio de Educación y Ciencia.

### BIBLIOGRAFÍA

- ALLEN, C. D., MACALADY, A. K., CHENCHOUNI, H., BACHELET, D., 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. H., ALLARD, G., RUNNING, S. W., SEMERCI, A. y 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.
- ANDEREGG, W. R. L., KANE, J. M. y ANDEREGG, L. D. L. (2013). "Consequences of widespread tree mortality triggered by drought and temperature stress". *Nature Climate Change*, 3, 30-36.
- ÁVILA, J. M., GALLARDO, A., IBÁÑEZ, B. y GÓMEZ-APARICIO, L. (2016). "Quercus suber dieback alters soil respiration and nutrient availability in Mediterranean forests". *Journal of Ecology*, 104, 1441-1452.
- ÁVILA, J. M., LINARES, J. C., GARCÍA-NOGALES, A., SÁNCHEZ, M. E. y GÓMEZ-APARICIO, L. (2017). "Across-scale patterning of plant-soil-pathogen interactions in Quercus suber decline". *European Journal of Forest Research*, 136, 677-688.
- BRASIER, C. M. (1992). "Oak tree mortality in Iberia". *Nature*, 360, 539.
- BRASIER, C. M. (1996). "Phytophthora cinnamomi and oak decline in southern Europe. Environmental constraints including climate change". *Annals of Forest Science*, 53, 347-358.
- BURNHAM, Kenneth P. y ANDERSON, David R. (2002). *Model Selection and Multi-Model Inference: A Practical Information-Theoretic Approach*, Secaucus, NJ, USA, Springer.
- CAI, Y. F., BARBER, P., DELL, B., O'BRIEN, P., WILLIAMS, N., BOWEN, B. y HARDY, G. (2010). "Soil bacterial functional diversity is associated with the decline of Eucalyptus gomphocephala". *Forest Ecology and Management*, 260, 1047-1057.
- CAMILO-ALVES, C.S.P., DA CLARA, M.I.E. y RIBEIRO, N.A. (2013). "Decline of Mediterranean oak trees and its association with Phytophthora cinnamomi: a review". *European Journal of Forest Research*, 132, 411-432.
- CANHAM, C. D. y URIARTE, M. (2006). "Analysis of neighborhood dynamics of forest ecosystems using likelihood methods and modeling". *Ecological Applications*, 16, 62-73.
- CARNICER, J., COLL, M., NINYEROLA, M., PONS, X., SÁNCHEZ, G. y PEÑUELAS, J. (2011). "Widespread crown condition decline, food web disruption, and amplified tree mortality with increased climate change-type drought". *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 108, 1474-1478.
- CLOW, D. W., RHOADES, C., BRIGGS, J., CALDWELL, M. y LEWIS, W. M. (2011). "Responses of soil and water chemistry to mountain pine beetle induced tree mortality in Grand County, Colorado, USA". *Applied Geochemistry*, 26, S174-S178.
- COX, Nicholas J (2011). "Stata tip 96: Cube roots". *Stata Journal*, 11, 149.

CONSECUENCIAS DEL DECAIMIENTO DEL ALCORNOCAL PARA EL FUNCIONAMIENTO  
DEL ECOSISTEMA EN EL CAMPO DE GIBRALTAR

José Manuel Ávila *et al.*

- CRAWLEY, M. J. (2007). *The R book*, UK, Wiley.
- CURIEL YUSTE, J, FERNANDEZ-GONZALEZ, AJ, FERNANDEZ-LOPEZ, M, OGAYA, R, PEÑUELAS, J, SARDANS, J y LLORET, F (2014). "Strong functional stability of soil microbial communities under semiarid Mediterranean conditions and subjected to long-term shifts in baseline precipitation". *Soil Biology and Biochemistry*, 69, 223-233.
- DURÁN, J., RODRÍGUEZ, A., FERNÁNDEZ-PALACIOS, J. M. y GALLARDO, A. (2008). "Changes in soil N and P availability in a *Pinus canariensis* fire chronosequence". *Forest Ecology and Management*, 256, 384-387.
- FLEISCHMANN, F, SCHNEIDER, D, MATYSSEK, R y OBWALD, WF (2002). "Investigations on net CO<sub>2</sub> assimilation, transpiration and root growth of *Fagus sylvatica* infested with four different Phytophthora species". *Plant Biology*, 4, 144-152.
- GALIANO, L., MARTINEZ-VILALTA, J., SABATE, S. y LLORET, F. (2012). "Determinants of drought effects on crown condition and their relationship with depletion of carbon reserves in a Mediterranean holm oak forest". *Tree Physiology*, 32, 478-489.
- GARCÍA-PALACIOS, Pablo, MILLA, Rubén, ALVARO-SANCHEZ, Mónica, MARTÍN-ROBLES, Nieves y MAESTRO, Melchor (2013). "Application of a high-throughput laboratory method to assess litter decomposition rates in multiple-species experiments". *Soil Biology & Biochemistry*, 57, 929-932.
- GÓMEZ-APARICIO, L., IBÁÑEZ, B., SERRANO, M. S., DE VITA, P., ÁVILA, J. M., PÉREZ-RAMOS, I. M., GARCÍA, L. V., SÁNCHEZ, M. E. y MARAÑÓN, T. (2012). "Spatial patterns of soil pathogens in declining Mediterranean forests: implications for tree species regeneration". *New Phytologist*, 194, 1014-1024.
- GÓMEZ-APARICIO, Lorena, ÁVILA, JM y CAYUELA, L (2013). "Métodos de máxima verosimilitud en ecología y su aplicación en modelos de vecindad". *Ecistemas*, 22, 12-20.
- HÖGBERG, Peter y READ, David J. (2006). "Towards a more plant physiological perspective on soil ecology". *Trends in Ecology & Evolution*, 21, 548-554.
- IBÁÑEZ, Beatriz, GÓMEZ-APARICIO, Lorena, ÁVILA, José M, PÉREZ-RAMOS, Ignacio M, GARCÍA, Luis V y MARAÑÓN, Teodoro (2015a). "Impact of tree decline on spatial patterns of seedling-mycorrhiza interactions: Implications for regeneration dynamics in Mediterranean forests". *Forest Ecology and Management*.
- IBÁÑEZ, Beatriz, GÓMEZ-APARICIO, Lorena, STOLL, Peter, AVILA, José M., PÉREZ-RAMOS, Ignacio M. y MARAÑÓN, Teodoro (2015b). "A neighborhood analysis of the consequences of *Quercus suber* decline for regeneration dynamics in Mediterranean forests". *PLoS ONE*, 10, e0117827.
- IPCC (2007). Regional Climate Projections. In: SOLOMON, S., QIN, D., MANNING, M., CHEN, Z., MARQUIS, M., AVERYT, K.B., TIGNOR, M. y MILLER, H.L. (eds.) *Climate Change 2007. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge (U.K.) and New York, NY (USA): Cambridge University Press.
- IPCC (2013). *Climate change 2013: the Physical Science Basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*.
- KOUNO, Kenji, TUCHIYA, Yasuhiro y ANDO, Tadao (1995). "Measurement of soil microbial biomass phosphorus by an anion exchange membrane method". *Soil Biology and Biochemistry*, 27, 1353-1357.
- LEVY-VARON, Jennifer H, SCHUSTER, William SF y GRIFFIN, Kevin L (2012). "The autotrophic contribution to soil respiration in a northern temperate deciduous forest and its response to stand disturbance". *Oecologia*, 169, 211-220.
- LOVETT, G. M., CANHAM, C. D., ARTHUR, M. A., WEATHERS, K. C. y FITZHUGH, R. D. (2006). "Forest ecosystem responses to exotic pests and pathogens in eastern North America". *Bioscience*, 56, 395-405.
- MANABE, S., MILLY, P. C. D. y WETHERALD, R. (2004). "Simulated long-term changes in river discharge and soil moisture due to global warming". *Hydrological Sciences Journal-Journal Des Sciences Hydrologiques*, 49, 625-642.
- MARAÑÓN, T, IBÁÑEZ, B, ANAYA-ROMERO, M, MUÑOZ-ROJAS, M y PÉREZ-RAMOS, IM (2012). Oak trees and woodlands providing ecosystem services in southern Spain. In: IAN D. ROTHERHAM, CHRISTINE HANDLEY, MAURO AGNOLETTI y SAMOJLIK, TOMASZ (eds.) *Trees Beyond the Wood*. Sheffield, UK: Wildtrack Publishing.
- MARTÍNEZ-VILALTA, J., LLORET, F. y BRESHEARS, D. D. (2012). "Drought-induced forest decline: causes, scope and implications". *Biology Letters*, 8, 689-691.
- MCCARROLL, Danny y LOADER, Neil J (2004). "Stable isotopes in tree rings". *Quaternary Science Reviews*, 23, 771-801.
- MEDAIL, Frederic y QUEZEL, Pierre (1997). "Hot-spots analysis for conservation of plant biodiversity in the Mediterranean Basin". *Annals of the Missouri Botanical Garden*, 112-127.
- OJEDA, F., MARAÑÓN, T. y ARROYO, J. (2000). "Plant diversity patterns in the Aljibe Mountains (S. Spain): A comprehensive account". *Biodiversity and Conservation*, 9, 1323-1343.
- ORWIN, K. H. y WARDLE, D. A. (2004). "New indices for quantifying the resistance and resilience of soil biota to exogenous disturbances". *Soil Biology and Biochemistry*, 36, 1907-1912.
- PEÑUELAS, Josep, FILELLA, Iolanda y COMAS, Pere (2002). "Changed plant and animal life cycles from 1952 to 2000 in the Mediterranean region". *Global Change Biology*, 8, 531-544.
- PÉREZ-RAMOS, I.M. (2006). Factores que condicionan la regeneración natural de especies leñosas en un bosque mediterráneo del sur de la Península Ibérica. Universidad de Sevilla.
- PLANTON, Serge, LIONELLO, Piero, ARTALE, Vincenzo, AZNAR, Rolland, CARRILLO, Adriana, COLIN, Jeanne, CONGEDI, Letizia, DUBOIS, Clotilde, ELIZALDE, Alberto, GUALDI, Silvio, HERTIG, Elke, JACOBET, Jucundus, JORDA, Gabriel, LI, Laurent, MARIOTTI, Annarita, PIANI, Claudio, RUTI, Paolo, SANCHEZ-GOMEZ, Emilia, SANNINO, Gianmaria,

CONSECUENCIAS DEL DECAIMIENTO DEL ALCORNOCAL PARA EL FUNCIONAMIENTO  
DEL ECOSISTEMA EN EL CAMPO DE GIBRALTAR

José Manuel Ávila *et al.*

- SEVAULT, Florence, SOMOT, Samuel y TSIMPLIS, Michael (2012). The Climate of the Mediterranean Region in Future Climate Projections. In: LIONELLO, P. (ed.) *The Climate of the Mediterranean Region*. Oxford: Elsevier.
- SANGÜESA-BARREDA, Gabriel, LINARES, Juan Carlos y CAMARERO, Julio (2013). "Drought and mistletoe reduce growth and water-use efficiency of Scots pine". *Forest Ecology and Management*, 296, 64-73.
- SERRANO, L. y PEÑUELAS, J. (2005). "Contribution of physiological and morphological adjustments to drought resistance in two Mediterranean tree species". *Biologia Plantarum*, 49, 551-559.
- SINGH, J. S. y GUPTA, S. R. (1977). "Plant decomposition and soil respiration in terrestrial ecosystems". *The Botanical Review*, 43, 449-528.
- SOLLA, Alejandro, GARCÍA, Lorena, PÉREZ, Andrea, CORDERO, Ana, CUBERA, Elena y MORENO, Gerardo (2009). "Evaluating potassium phosphonate injections for the control of *Quercus ilex* decline in SW Spain: implications of low soil contamination by *Phytophthora cinnamomi* and low soil water content on the effectiveness of treatments". *Phytoparasitica*, 37, 303-316.
- STURSOVA, Martina, SNAJDR, Jaroslav, CAJTHAML, Tomas, BARTA, Jiri, SANTRUCKOVA, Hana y BALDRIAN, Petr (2014). "When the forest dies: the response of forest soil fungi to a bark beetle-induced tree dieback". *Isme Journal*, 8, 1920-1931.
- TORRES, E. (1995). "Estudio de los principales problemas selvícolas de los alcornoques del macizo del Aljibe (Cádiz y Málaga)". Universidad Politécnica de Madrid.
- VICENTE-SERRANO, Sergio M., LOPEZ-MORENO, Juan I., BEGUERÍA, Santiago, LORENZO-LACRUZ, Jorge, SANCHEZ-LORENZO, Arturo, GARCÍA-RUIZ, José M., AZORIN-MOLINA, Cesar, MORÁN-TEJEDA, Enrique, REVUELTO, Jesús, TRIGO, Ricardo, COELHO, Fátima y ESPEJO, Francisco (2014). "Evidence of increasing drought severity caused by temperature rise in southern Europe". *Environmental Research Letters*, 9, 044001.
- WANG, X., COMITA, L. S., HAO, Z., DAVIES, S. J., YE, J., LIN, F. y YUAN, Z. (2012). "Local-scale drivers of tree survival in a temperate forest". *PLoS One*, 7, e29469.
- WETHERALD, R. T. y MANABE, S. (2002). "Simulation of hydrologic changes associated with global warming". *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 107.