

# Integrando escalas y métodos LTER para comprender la dinámica global de un espacio protegido de montaña: el Parque Nacional de Ordesa y Monte Perdido

M.B. García<sup>1\*</sup>, C.L. Alados<sup>1</sup>, R. Antor<sup>2</sup>, J.L. Benito Alonso<sup>3</sup>, J.J. Camarero<sup>1</sup>, F. Carmena<sup>2</sup>, P. Errea<sup>1</sup>, F. Fillat<sup>1</sup>, R. García-González<sup>1</sup>, J.M. García-Ruiz<sup>1</sup>, M. Gartzia<sup>1</sup>, D. Gómez García<sup>1</sup>, I. Gómez<sup>2</sup>, P. González-Sampériz<sup>1</sup>, E. Gutiérrez<sup>4</sup>, J.J. Jiménez<sup>1</sup>, J.I. López-Moreno<sup>1</sup>, P. Mata<sup>5</sup>, A. Moreno<sup>1</sup>, P. Montserrat<sup>1</sup>, P. Nucho<sup>1</sup>, I. Pardo<sup>1</sup>, J. Revuelto<sup>1</sup>, M. Rieradevall (†)<sup>4,6</sup>, H. Sáiz<sup>1</sup>, P. Tejero<sup>1</sup>, S. Vicente-Serrano<sup>1</sup>, E. Villagrasa<sup>7</sup>, L. Villar<sup>1</sup>, B. Valero-Garcés<sup>1</sup>

- (1) Instituto Pirenaico de Ecología (CSIC). Avda. Nuestra Señora de la Victoria, s/n, 22700 Jaca (Huesca) y Campus de Aula Dei, Avda. Montañana, 1005, 50059 Zaragoza. España.  
(2) Empresa pública SARGA, Avenida de Ranillas nº 5, Edificio A, 3ª planta, 50018 Zaragoza. España.  
(3) JOLUBE consultor botánico y editor; c/Mariano Rguez. de Ledesma, nº 4; 22700-JACA (Huesca). España.  
(4) Departament d'Ecologia, Facultat de Biologia, Universitat de Barcelona (UB), Diagonal 643, 08028 Barcelona. España.  
(5) Instituto Geológico y Minero, La Calera 1, 28760 Tres Cantos (Madrid). España.  
(6) IRBio (Institut de Recerca de Biodiversitat), Universitat de Barcelona. España.  
(7) Parque Nacional de Ordesa y Monte Perdido (Gobierno de Aragón). Avenida Juan XXIII, 2, 22003, Huesca. España.

\* Autor de correspondencia: M.B. García González [mariab@ipe.csic.es]

> Recibido el 06 de junio de 2015 - Aceptado el 26 de diciembre de 2015

**García M.B., Alados, C.L., Antor, R., Benito Alonso, J.L., Camarero, J.J., Carmena, F., Errea, P., Fillat, F., García-González, R., García-Ruiz, J.M., Gartzia, M., Gómez García, D., Gómez, I., González-Sampériz, P., Gutiérrez, E. Jiménez, J.J., López-Moreno, J.I., Mata, P., Moreno, A., Montserrat, P., Nucho, P., Pardo, I., Revuelto, J., Rieradevall, M., Sáiz, H., Tejero, P., Vicente-Serrano, S., Villagrasa, E., Villar, I., Valero-Garcés, B. 2016. Integrando escalas y métodos LTER para comprender la dinámica global de un espacio protegido de montaña: el Parque Nacional de Ordesa y Monte Perdido. *Ecosistemas* 25(1): 19-30. Doi.: 10.7818/ECOS.2016.25-1.04**

Los espacios protegidos, por el hecho de albergar una gran geo-biodiversidad y asegurar una baja intervención humana, constituyen lugares muy adecuados para el seguimiento de organismos y procesos a escala ecológica, así como para la obtención de series temporales largas a escala geológica. En el marco de la red LTER-España, el Parque Nacional de Ordesa y Monte Perdido (PNOMP) y el Instituto Pirenaico de Ecología-CSIC están impulsando estudios para la detección de cambios a distintas escalas mediante variados métodos y aproximaciones. Destacamos aquí los más consolidados, entre los que se encuentran los análisis de registros de sedimentos en lagos, espeleotemas en cuevas, la dinámica de uno de los pocos glaciares activos de la Península ibérica, el análisis físico-químico de aguas corrientes e ibones de alta montaña, el registro del cambio climático actual en árboles longevos, la afección que éste ejerce sobre masas actuales de pinos en el límite superior del bosque y de abetales en zonas húmedas, la matorralización de algunos pastos y los procesos mecanicistas que subyacen, la reorganización de la diversidad florística en pastos tras el abandono paulatino o drástico de la ganadería, la biodiversidad de las comunidades alpinas y la dinámica poblacional de especies amenazadas o indicadoras de hábitats o de motores de cambio global.

Los seguimientos ecológicos actuales muestran que tanto el cambio climático como el de usos del suelo están teniendo una considerable trascendencia en la fisonomía y la estructura de algunos de los ambientes más icónicos y frecuentes del parque (deterioro del glaciar, termofilización de la flora en cumbres alpinas, densificación del bosque en su límite superior, pérdida de productividad en algunos pastos supraforestales, etc.). También sugieren una importante variabilidad espacial en los procesos (por ej. en el PNOMP conviven pastos matorralizados y pastos muy estables), y evidencian que los cambios observados no siempre siguen los paradigmas establecidos (por ej., las especies amenazadas mantienen dinámicas poblacionales estables). La integración de resultados parciales proporcionados por cada aproximación relativiza la importancia de las percepciones que cada estudio destaca por separado, y permite medir los cambios actuales en el marco de referencia de los cambios a escala geológica. Predecir la resistencia y resiliencia de los ecosistemas o las poblaciones de seres vivos para enfrentarse a los futuros cambios ambientales es complicado, no sólo por la falta de conocimientos disponibles sino también porque las respuestas que observamos no siempre son tan rápidas o lineales como se espera. La modelización constituye una herramienta cada vez más utilizada, pero requiere de evidencias reales para validar sus pronósticos, por lo que la observación de los procesos que actúan en el PNOMP ha de incluir un esfuerzo continuado de monitorización multiescalar y multidisciplinar de los distintos componentes de la geo, hidro-, crío- y biosfera, sin olvidar el componente humano. Entender la complejidad supone conectar las interacciones que existen entre todos los sistemas y ponderar sus efectos según las escalas de trabajo.

**Palabras clave:** seguimiento ecológico; Holoceno; paisaje; comunidades vegetales; ganadería; bosques; cambio global; glaciar; matorralización; pastos; especies amenazadas; GLORIA

García M.B., Alados, C.L., Antor, R., Benito Alonso, J.L., Camarero, J.J., Carmena, F., Errea, P., Fillat, F., García-González, R., García-Ruiz, J.M., Gartzia, M., Gómez García, D., Gómez, I., González-Sampériz, P., Gutiérrez, E., Jiménez, J.J., López-Moreno, J.I., Mata, P., Moreno, A., Montserrat, P., Nuche, P., Pardo, I., Revuelto, J., Rieradevall, M., Sáiz, H., Tejero, P., Vicente-Serrano, S., Villagrasa, E., Villar, I., Valero-Garcés, B. 2016. Integrating scales and LTER methods to better understand the overall dynamics of a mountain protected space: the Ordesa and Monte Perdido National Park. *Ecosistemas* 25(1): 19-30. Doi.: 10.7818/ECOS.2016.25-1.04

The Ordesa and Monte Perdido National Park and the Pyrenean Institute of Ecology (CSIC) recently joined the Spanish LTER network. As part of our strategy to understand recent changes in this protected area, we are carrying out a number of projects to evaluate changes at different spatio-temporal scales, using a variety of methods and approaches. We highlight here some of the most consolidated ones: long-term reconstructions from sedimentary lake records and cave speleothemes, the dynamics of one of the few active Iberian glaciers, the physico-chemical components of alpine streams, springs and lakes, the fingerprint of climatic change from ancient trees, changes in the composition and structure of biodiversity of alpine communities, natural and man-made grasslands at different altitudes, and the treeline, and population dynamics of endangered species or habitat indicators.

The ecological monitoring shows that changes in both climate and land use, are having a strong influence in the physiognomy and structure of some of the most iconic and abundant habitats in the National Park. However, we found an important spatial variability in some processes, and also that others do not fit the established paradigms. The integration of partial results obtained from different methodologies and approaches diminishes the importance of each perception separately, helps to evaluate current changes in a long-term framework (geological scale), and will serve to validate the forecasts when modeling future environmental scenarios.

**Keywords:** ecological monitoring; Holocene; landscape; grassland; cattle; glacier; encroachment; endangered species; GLORIA

## Introducción

Uno de los aspectos más importantes a considerar en el estudio de la dinámica de los sistemas naturales es la escala espacio-temporal de observación, ya que procesos que pasan desapercibidos a una gran escala pueden ser claves a otra de mayor resolución. Por ejemplo, la pérdida de diversidad por extinción de poblaciones puede producirse a escala local en un periodo de pocos años, mientras que la sustitución o transformación de algunos hábitats puede llevar centenares de años y afectar a territorios relativamente extensos. Nuestra capacidad para detectar y comprender la relación entre dinámica natural y motores de cambio global, así como los patrones y mecanismos subyacentes dependerá, por tanto, del ajuste entre la escala elegida y el proceso estudiado (Hewitt et al. 2010). Si a esta naturaleza multiescalar se le suma el abanico de variables bióticas y abióticas que interactúan, parece conveniente una aproximación holística que integre y considere una estructuración jerárquica de las escalas y procesos, con el fin de comprender mejor cómo los sistemas naturales han llegado al estado actual y cuáles pueden ser sus respuestas en los posibles escenarios futuros.

Los espacios protegidos, especialmente los de montaña, contienen una gran geo-biodiversidad y ofrecen numerosos servicios ecosistémicos (Harrison et al. 2010; Spehn et al. 2012), siendo por tanto sistemas muy adecuados para seguimientos ecológicos. Pueden parecer paisajes prístinos poco influenciados por la actividad humana, sin embargo no podrían entenderse sin su acción pasada (García-Ruiz et al. 2015). Los recientes cambios socio-económicos de las zonas rurales, desencadenantes de un cambio de uso de suelo sin precedentes en la historia, así como el ya constatado cambio climático, constituyen los principales motores del cambio global al que no pueden escapar estos espacios por más que la legislación actual minimice la destrucción o el deterioro del patrimonio natural que albergan (por ej. Sala et al. 2000). Es por ello que el desarrollo de seguimientos ecológicos a largo plazo (*Long Term Ecological Research*: LTER; Nichols y Williams 2006; Magurran et al. 2010) permitirá valorar los lentos cambios en la biodiversidad por efecto indirecto de la acción humana, y la capacidad de respuesta natural de hábitats y especies.

Cuando hablamos de seguimientos LTER solemos pensar en la necesidad de mantener la monitorización de algunos geo-ecosistemas y procesos más allá de algunos años, para poder obtener largas series temporales que nos ayuden a descifrar su evolución y entender la dinámica de sus procesos y su relación con el cambio global actual. Pero, ¿es esto suficiente o necesitamos también conocer la dinámica pasada? En los últimos años, el Parque Nacional de Ordesa y Monte Perdido (PNOMP) y el Instituto Pirenaico de Ecología (IPE-CSIC) se han asociado para formar un nodo de la red LTER-España, impulsando diversos estudios de series tempo-

rales y seguimiento ecológico que cubren desde los cambios a escala geológica a lo largo del Cuaternario hasta los cambios anuales en variables ambientales y poblaciones de organismos indicadores. En este artículo resumimos los seguimientos más consolidados en relación a registros de sedimentos en lagos, espeleotemas en cuevas, dinámica glaciaria, análisis físico-químico de aguas corrientes e ibones de alta montaña, registro del cambio climático actual en árboles longevos, matorralización de algunos pastos, evolución de la diversidad florística en pastos y comunidades alpinas, y dinámica poblacional de especies amenazadas, indicadoras de hábitats o de motores de cambio global. Nuestra intención es doble: 1) mostrar el rango de escalas y métodos utilizados en un mismo espacio protegido, y 2) destacar el valor de una aproximación multidisciplinar, multiescalar y ponderada, con el fin de obtener una visión global de la evolución de un sistema de alto valor natural.

## El Parque Nacional de Ordesa y Monte Perdido

Con sus aproximadamente 35 000 Ha (incluyendo zona periférica), el PNOMP es uno de los más conocidos y antiguos de España (declarado en 1918 y ampliado en 1982). Se localiza en el Pirineo central, en la frontera con Francia, y como parque de montaña se caracteriza por una abrupta topografía debido al fuerte desnivel altitudinal existente en los 4 profundos valles que radian del mayor macizo calizo de Europa (rango altitudinal: 700-3355 m; Rodríguez Fernández y Robador Moreno 2014), destacables fenómenos kársticos, uno de los pocos complejos glaciares activos de la Península ibérica, lagos de alta montaña y 34 cumbres que superan los 3000 m de altitud. Contiene distintos tipos de manchas boscosas (pinar, abetal, hayedo, quejigar, carrascal, bosque galería...), matorrales y pastos supraforestales, y alberga casi 1400 plantas vasculares autóctonas (Benito Alonso 2006), —aproximadamente una quinta parte del total de la flora estimada para la Península ibérica, incluyendo más de 80 endemismos pirenaicos—, así como más de 180 especies de vertebrados y 600 artrópodos.

Por tratarse de un espacio de alta montaña, los pastos supraforestales y los canchales rocosos situados por encima de los 1800 m de altitud acaparan la mayor superficie del Parque (Aldezabal 2001). Al igual que ha ocurrido en el resto del Pirineo, los pastos han sido utilizados durante milenios como estiveros para el ganado mayor (Fillat et al. 2008), y uno de los procesos ecológicos más activos es la reducción de la extensión de dichos pastos debido a que la carga ganadera ha caído considerablemente tras su máximo a principios del siglo XX (Fillat et al. 2008). El acusado descenso del pastoreo está relacionado con el hecho de que el Parque se localiza en una región escasamente poblada y fuertemente envejecida, así como la baja rentabilidad económica de la ganadería extensiva (García-Ruiz et al. 1996). El envejecimiento de la población circundante hace sospechar nuevos descensos en la carga ganadera en un futuro próximo.

## Reconstruyendo el pasado

La investigación de la dinámica de la vegetación, los glaciares, el clima y el paisaje en el PNOMP mediante paleoregistros proporciona reconstrucciones que incluyen desde las últimas décadas hasta el reciente periodo interglacial (Holoceno, últimos 11 700 años), e incluso el periodo anterior glacial (últimos 60 000 años). Son series temporales basadas en modelos de edad absolutos, con una resolución temporal variable. En un macizo kárstico como el PNOMP, los datos existentes provienen del registro sedimentario de lagos y espeleotemas (formaciones de carbonato en cuevas, como las estalactitas y estalagmitas) y, secundariamente, de depósitos glaciares y umbrales pulidos por el paso del hielo.

La localización de algunos de los elementos más paradigmáticos del PNOMP (llanos de La Larri, ibón de Marboré, glaciares y morrenas del circo de Pineta y Marboré) ha estado controlada por la geología y la evolución climática desde la retirada de los glaciares. Los llanos de La Larri (1560 m s.n.m.) provienen de un paleo-lago originado por el bloqueo hace más de 35 000 años de un valle lateral por la morrena principal del glaciar de Pineta, que se rellenó de sedimentos hasta hace unos 11 000 años, cuando fue drenado tras el retroceso del glaciar (Salazar-Rincón et al. 2013). Los sedimentos acumulados durante el Holoceno en el lago de Marboré, situado a mayor altitud (2600 m, Fig. 1), muestran un periodo con mayores aportes detríticos al lago y una mayor bioproduktividad hasta el Holoceno Medio (en torno a hace 4000-5000 años antes del presente), y una transición en el Holoceno tardío que se interpreta como una respuesta al incremento global de la aridez, coherente con otros registros (valle de La Estiva y espeleotemas). La morrena más externa del circo de Marboré, al pie de la cara norte de Monte Perdido, como demuestran las dataciones, se formó hace 5100 años, reflejando un avance de los glaciares a mediados del Holoceno (García-Ruiz et al. 2014). El demostrado aumento de temperatura a escala hemisférica durante la Anomalía Climática Medieval (ACM, siglos IX y XIV de nuestra era, PAGES2k Consortium 2013) provocó una disminución de disponibilidad hídrica en la península ibérica (Moreno et al. 2012; Morellón et al. 2012), y los registros muestran un impacto similar en zonas de alta montaña, como el PNOMP. La rápida respuesta de los ecosistemas del Parque durante la Pequeña Edad del Hielo (entre los años 1350 y 1850 AD) se muestra con el avance de los glaciares (García-Ruiz et al. 2014) y cambios en el tipo de sedimentación en el lago de Marboré, durante este periodo más húmedo (Valero-garcés et al. 2013; Olivaria et al. 2013).



**Figura 1.** Ibón de Marboré en el Balcón de Pineta (izda.). La fotografía captura el momento de descarga de la plataforma flotante del IPE-CSIC mediante helicóptero, que permitió recuperar sondeos sedimentarios del fondo del lago en 2011. Los gráficos de la derecha corresponden a los perfiles de temperatura y pH durante los meses de septiembre de 2013 y 2014, en función de la profundidad (inédito).

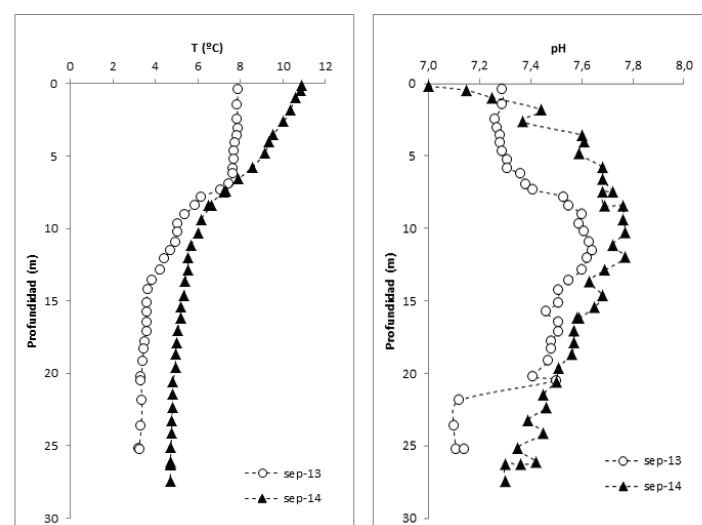
**Figure 1.** Marboré Lake and the rim of the Marboré cirque (Pineta balcony) (left). The photograph captures the unloading of the floating coring platform transported by helicopter to recover sediment lake cores in 2011. Plots (right) show temperature and pH depth profiles measured in September 2013 and 2104 (unpublished data)..

El análisis polínico también muestra que si bien el manejo del paisaje ha sido intenso en las zonas llanas desde épocas medievales, también ha sido notable en las zonas de altura, con deforestación para obtener pastos de verano y aprovechamiento de recursos (datos inéditos para el PNOMP). La segunda mitad del siglo XIX y el comienzo del siglo XX es el periodo de mayor presión demográfica en la montaña pirenaica, pero se han obtenido evidencias de la existencia de contaminación atmosférica en relación con las actividades mineras con picos de concentración de Pb asociados a las épocas romana, medieval y contemporánea, que reflejan el influjo local de la minería en el valle del Alto Cinca (Parzán; Valero-Garcés et al., 2013).

El mejor registro para determinar la variabilidad ambiental de los últimos cientos de años se encuentra en los árboles, plasmada en características de sus anillos anuales de crecimiento tales como el grosor, la densidad o la composición isotópica. En el caso de los bosques pirenaicos, la dendrocronología ha permitido establecer series medias de crecimiento bien replicadas desde 1500 AD, y en algún caso desde el siglo X. Se basan en la datación y medida de anillos de pinos negros longevos (*Pinus uncinata*), que suelen crecer muy poco al estar limitados por la breve estación de crecimiento en las zonas de gran altitud. En el PNOMP crecen pinos negros de hasta 600 años (Senda de los Cazadores).

¿De qué modo muestran estos testigos excepcionales los cambios ambientales a los que estamos sometiendo al planeta? A menudo de maneras inesperadas, tal y como hemos ido aprendiendo en estudios realizados desde los años 90. Los árboles más viejos, por ejemplo, no están creciendo más pese a que las temperaturas están aumentando desde finales del siglo XIX y a que disponen de más carbono gaseoso para la fotosíntesis (Camarero et al. 2015). Además, algunos de estos bosques situados en zonas con suelos rocosos o sobre pendientes pronunciadas, están mostrando limitaciones del crecimiento debidas a sequías condicionadas por el aumento de temperaturas (Galván et al. 2014; 2015). De hecho, los bosques maduros cuyo crecimiento responde de manera más acorde al aumento de concentración de CO<sub>2</sub> están situados en zonas más húmedas, y son escasos en el PNOMP. Por tanto, no es esperable que sean los pinos más viejos sino los más jóvenes los que resulten más beneficiados con el aumento de la temperatura.

¿Cómo se traducen esas respuestas dispares del crecimiento de los bosques de pino negro en cuanto a su dinámica? El Pirineo está experimentando procesos de expansión de los matorrales y bosques a costa de los pastos supraforestales, y el PNOMP ilustra bien este cambio, sobre todo mediante una rápida colonización de prados de siega situados a altitudes medias por parte del pino

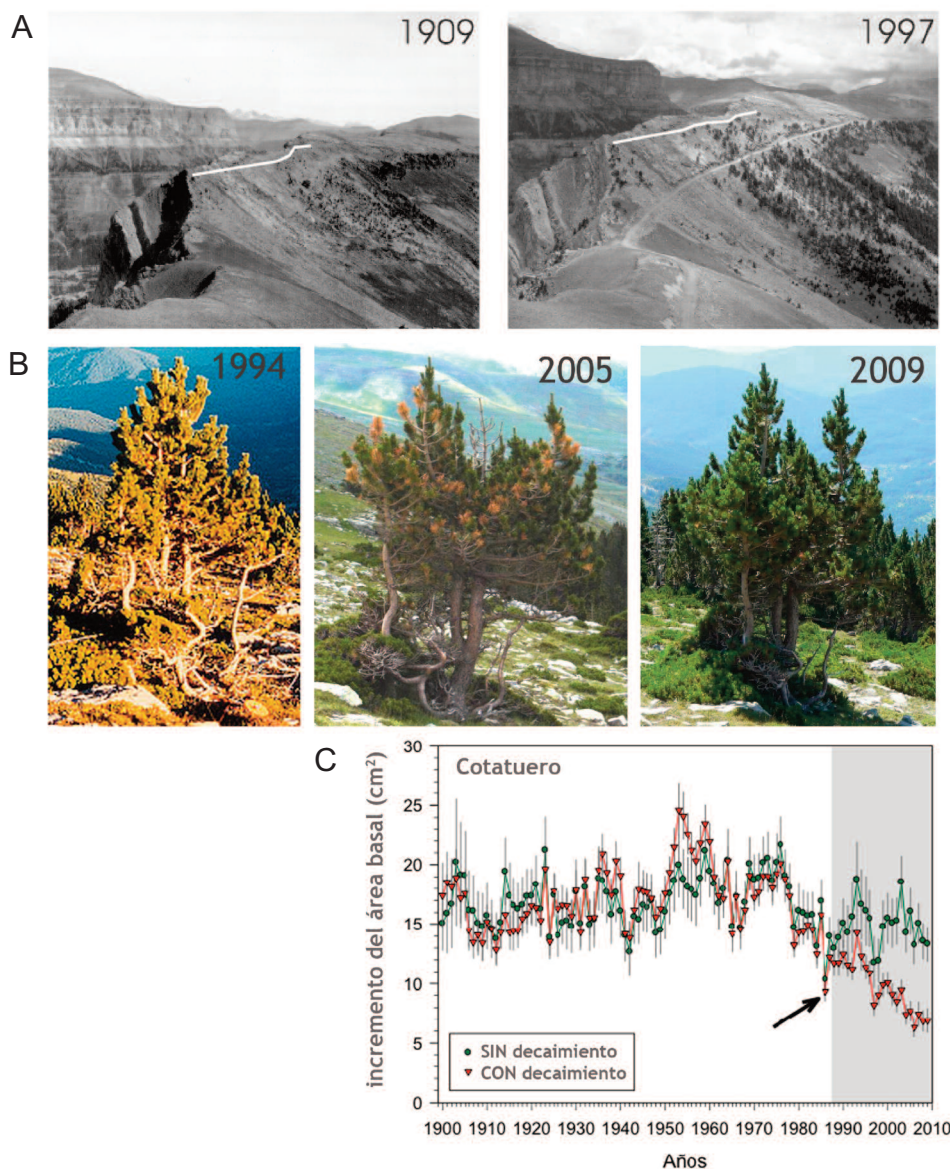


silvestre (*Pinus sylvestris*). Sin embargo, a mayor altitud la dinámica del límite del bosque no es tan rápida y se ha caracterizado por una “densificación” progresiva a lo largo del pasado siglo, inducida por el abandono del pastoreo pero favorecida también por el calentamiento climático (Camarero y Gutiérrez 2004). Este proceso de recolonización del bosque ha sido muy intenso en la segunda mitad del siglo XX cerca y debajo del límite superior del bosque, pero no ha significado necesariamente un ascenso de los árboles aislados situados a más altitud (Fig. 2A). El límite del bosque en el PNOMP, por tanto, sí ha reflejado los cambios ambientales rápidos de la segunda mitad del siglo pasado en cuanto a una rápida densificación y a un mayor crecimiento radial y vertical de los individuos jóvenes (Fig. 2B), pero la ascensión del límite superior del bosque ha sido más rápida en otros periodos climáticamente más estables, como la primera mitad del siglo XX.

## Monitorizando los cambios actuales

### El glaciar de Monte Perdido: testigo excepcional del cambio climático

La cartografía de detalle del circo de Marboré y las dataciones con isótopos cosmogénicos (García Ruiz et al. 2014) han mostrado que el circo estaba parcialmente sin hielo desde el comienzo del Holoceno, y que se han sucedido varias fases de avance del glaciar de Monte Perdido durante el Holoceno medio (hace unos 5100 años), en época medieval (en el periodo entre hace 1400 y 1200 años), y durante la Pequeña Edad del Hielo (dos pulsaciones, una a finales del siglo XVII – comienzo del XVIII y otra entre 1790 y 1830). Desde la mitad del siglo XIX, el glaciar se encuentra en claro retroceso.



**Figura 2.** A) Ejemplo de densificación del límite superior del bosque en la Sierra de las Cutas, PNOMP (modificado de Camarero y Gutiérrez 2004). La línea blanca corresponde al límite del bosque, el cual no ha variado realmente en los últimos 100 años; sin embargo sí puede apreciarse la densificación generalizada en el bosque que ocupa la pendiente. B) Evolución del crecimiento de un pino negro que forma el límite del bosque en esa zona (nótese la pérdida de acículas y mortalidad de ramas en el año 2005). C) Cambios en el crecimiento radial (incremento de área basal) desde inicios del siglo XX de abetos mostrando (triángulos) o no mostrando (círculos) síntomas recientes de decaimiento (defoliación de la copa) en Cotatuero (PNOMP). La flecha señala la sequía de 1985-1986 que marca el inicio de la divergencia de crecimiento entre las dos clases de árboles (área gris). Modificado de Sangüesa-Barreda et al. (2015).

**Figure 2.** A) An example of increasing vegetation density at the upper timberline in Sierra de las Cutas PNOMP (modified from Camarero and Gutiérrez 2004). White line corresponds to the timberline, which has been essentially at the same altitude during the last 100 years; however note the increase in vegetation density in the forest covering the slopes. B) Evolution of *Pinus negra*, the tree that grows in the upper forest limit in this area (note the loss of needles and branch mortality in 2005). C) Changes since the 20th century onset in radial growth (increase in basal surface area) in *Abies* trees showing (triangles) and not showing (circles) recent decay symptoms (defoliation) in Cotatuero (PNOMP). The arrow marks the 1985-1986 drought and the onset of a differentiated growth behavior of the two *Abies* types (grey area). Modified from Sangüesa-Barreda et al. (2015).

Cada otoño desde el 2011 se mide la superficie del glaciar situado en la cara norte de Monte Perdido mediante un láser escáner terrestre. Dicha técnica permite obtener topografías de detalle (<1 metro de lado celda) de la superficie del glaciar. Así, mediante comparación de años sucesivos, pueden estimarse los cambios de volumen del hielo de glaciar a muy elevada resolución (Fig. 3). Los resultados obtenidos hasta el momento informan de una pérdida generalizada de hielo, que en promedio está en torno a 2.5 metros desde 2011 y que en diversos sectores supera los cinco metros de espesor (López-Moreno et al. 2015). La parte alta del sector oriental del glaciar inferior es la única que mantiene los espesores, e incluso se ha podido incrementar ligeramente, debido a la menor insolación en una topografía muy favorable.

Las mayores pérdidas se han producido durante la temporada 2011-2012, año particularmente seco y cálido, mientras que en las temporadas 2012-2013 y 2013-2014 el glaciar ha permanecido prácticamente estable a pesar de recibir acumulaciones de nieve excepcionalmente altas en relación a las últimas décadas, y de registrar veranos relativamente frescos. La incapacidad de recuperación durante estos dos años, particularmente favorables para el desarrollo glaciar, sugiere que se encuentra en condiciones de claro desequilibrio climático, indicando muy pocas posibilidades de recuperación en caso de mantenerse las condiciones climáticas observadas en las últimas tres décadas (López-Moreno et al. 2015).

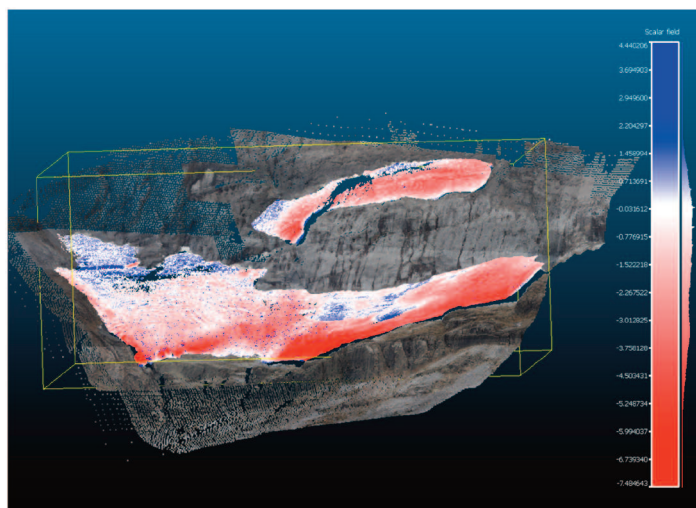
#### Lagos, cuevas y manantiales. El agua en un macizo kárstico

El agua es un elemento de especial interés en el PNOMP, aunque sólo recientemente hemos empezado a tener datos del ciclo hidrológico. Desde 2011 se realizan medidas estacionales de las propiedades físico-químicas y biológicas de las aguas del lago de Marboré a distintas profundidades, y se han instalado sensores para la medición continua de temperatura del agua (Fig. 1), monitorizándose las comunidades de diatomeas, macroinvertebrados y quironómidos. Desde 2011 se lleva a cabo un muestreo de fuentes seleccionadas por parte del personal del Parque, el IPE-CSIC, el IGME, el IACT-CSIC y la UAM, para su estudio isotópico y composicional (Lambán et al. 2014).

El PNOMP es el único de la red de Parques Nacionales en el que se está monitorizando la evolución de cuevas de hielo (Cueva helada de Casteret), en la que se han reconocido secuencias de hielo fósil que albergan información del último milenio. En esta cavidad, actualmente cerrada a las visitas de los turistas, se están monitorizando variables ambientales de cara a evaluar el impacto que el cambio climático actual está teniendo en la fusión de sus depósitos de hielo, muy mermados en los últimos años. En otras cuatro cuevas localizadas en el sector de Escuaín se está llevando a cabo la monitorización de variables ambientales (temperatura, CO<sub>2</sub>, humedad relativa) y de variables composicionales en el goteo y carbonato precipitado (Fig. 4).

#### La batalla de los perdedores: los pastos generados por usos tradicionales

Si el retroceso del glaciar es evidente para quienes han visitado el PNOMP durante las últimas décadas, no lo es menos el cambio en la superficie ocupada por los pastos. La deforestación del bosque subalpino en tiempos históricos para facilitar la trashumancia propició el desarrollo de procesos geomorfológicos muy intensos, en especial deslizamientos superficiales que han contribuido a la redistribución espacial del suelo y de su funcionamiento hidrológico, sobre todo en las calizas margosas del entorno de los barrancos Pardina y Capradiza, y sobre sustrato flysch. Por el contrario, en las últimas décadas se observa la matorralización de muchas laderas de pastos y de campos abandonados, de forma particularmente relevante por debajo del límite del bosque, donde, a diferencia de lo que ocurre por encima de él, los factores antrópicos son más determinantes que los físicos. El principal actor en dicha transformación es el erizón (*Echinospartum horridum*).



**Figura 3.** Visualización de la diferencia en la altura de la superficie del glaciar del PNOMP entre los años 2011 y 2014. Las zonas en color rojo son las que han experimentado pérdidas de más de un metro de espesor de hielo, mientras las zonas azules señalan dónde se ha ganado espesor de hielo, expresando de forma clara la dominancia de superficie donde el balance de masa glaciar ha sido negativo.

**Figure 3.** Visualization of the glacier surface height change between 2011 and 2014. Areas in red color have experienced ice thickness losses greater than one m, and those in blue have gained some ice thickness. The graph shows clearly that most of the glacier surface has experienced a negative mass balance.



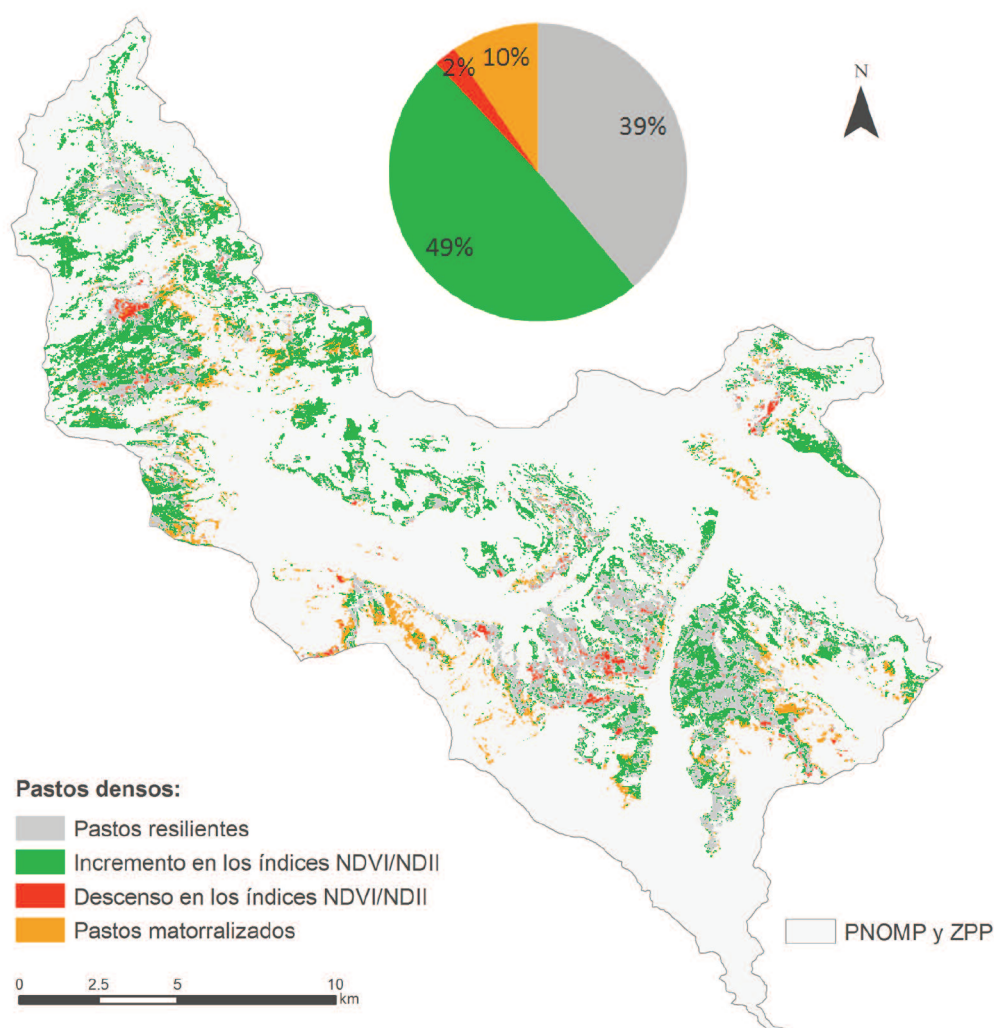
**Figura 4.** A) Perfil de hielo fósil en una cavidad del Parque Nacional de Ordesa y Monte Perdido. B) Colector del goteo para su análisis isotópico en cavidades del PNOMP.

**Figure 4.** A) Fossil ice profile in a cave in the PNOMP. B) Drip water sampler for isotope analyses located in one of the monitored caves in the PNOMP.

El avance de la matorralización de los pastos subalpinos en el periodo 1980-2000 se analiza con la ayuda de imágenes de satélite, que permiten identificar los cambios fisionómicos y fisiológicos de la vegetación. La variable que tiene una mayor importancia para explicar el proceso es la distancia a los hábitats forestales, desde donde se proporcionan las semillas necesarias para la colonización de los arbustos (Gartzia et al. 2014). La colonización por arbustos se intensifica cuando los pastos pierden vigor, como ocurre en las zonas con mayor pendiente (Komac et al. 2012). El uso de la tecnología satélite permite también monitorizar los cambios en biomasa y verdor de los pastos por medio de los índices vegetales NDVI y NDII, y de esta forma valorar su resiliencia en respuesta a los cambios ambientales y antropogénicos (Fig. 5; Gartzia et al. 2016).

La transición de pastos a comunidades leñosas ha afectado a la mayoría de las montañas europeas, y sin embargo todavía no se conoce bien la interacción entre el proceso de abandono de tierras y el cambio climático. Debido a que las interacciones entre arbustos son el mecanismo principal en el proceso de matorralización, y que el cambio climático podría afectar a la dinámica de las interacciones, comparamos a lo largo de un gradiente altitudinal dicha dinámica entre dos de las especies responsables de la matorralización: el erizón, y el boj (*Buxus sempervirens*). El análisis revela que durante los estadios tempranos de desarrollo del boj, éste se ve favorecido bajo la copa de erizón. Cuando el boj se hace adulto, ejerce un efecto negativo sobre el erizón en el que se desarrolló, desplazándolo (Nuche 2016).

Puesto que la matorralización supone la pérdida no solo de diversidad sino de recursos económicos (pastos para el ganado), se están analizando los efectos sobre la dinámica vegetal, la conservación del suelo y la estructura de la comunidad vegetal, de distintos tratamientos como el fuego y el desbroce. Para ello se realiza un seguimiento tras las quemadas controladas realizadas por el Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino en el entorno del PNOMP. Los resultados preliminares muestran un reducido e insuficiente efecto de la quema y del desbroce para controlar la matorralización. Tras la quema se produce una disminución de la materia orgánica, N y C, y aumento de la diversidad del banco de semillas por aportaciones externas al haber desaparecido la barrera de matorral que frenaba su entrada. Después de 6 años de la quema, la zona está completamente cubierta de nuevo por erizón (Nuche 2016), y la estructura y diversidad de la comunidad se recupera a los estados anteriores al tratamiento. La modelización de la sucesión vegetal desde pasto hasta matorral, y los mecanismos de interacción implicados en esta dinámica sucesional, permiten evaluar las estrategias de control de expansión de matorral y conservación de pastos. Los arbustos que invaden los pastos tienen una respuesta al clima que depende de las interacciones bióticas entre plantas en la comunidad vegetal. Los modelos de autómatas celulares permiten simular el efecto del fuego y el pastoreo en la expansión de la matorralización en los pastos subalpinos y su relación con la diversidad ecológica y funcional (Komac et al. 2013; Nuche 2016).



**Figura 5.** Cambios detectados en los pastos densos del Parque Nacional de Ordesa y Monte Perdido (PNOMP) y su zona periférica de protección (ZPP) entre las décadas de 1980 y 2000 (Gartzia et al 2014 y 2016). El incremento en los índices muestra un incremento en biomasa y en verdor de los pastos; el descenso de los índices detecta la degradación del pasto.

**Figure 5.** Changes observed in dense grasslands in the PNOMP between 1980 and 2000 (Gartzia et al 2014 and 2016). An increase of indexes indicates increase in biomass and greenness, whereas a decrease means degraded grasslands.

## ¿Y si desapareciese por completo el pastoreo?

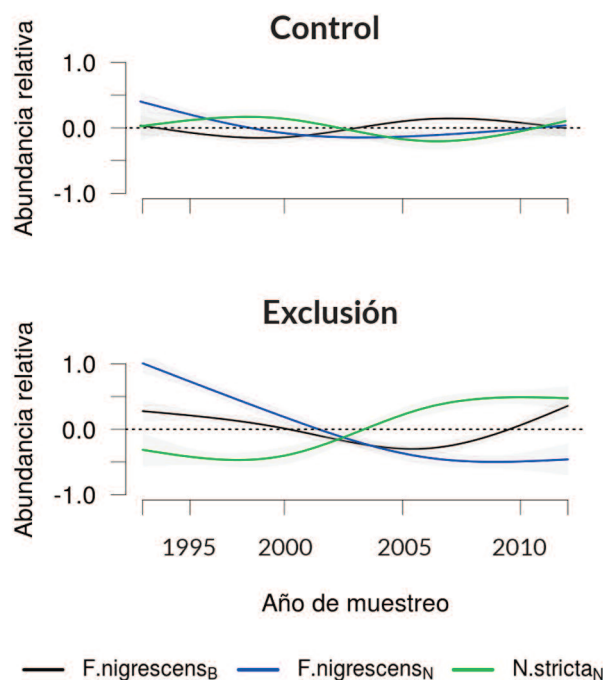
Pero no todos los pastos están matorralizándose, un proceso que se da principalmente en laderas orientadas al sur y por debajo de los 2100 m s.n.m. Por encima del límite actual del bosque encontramos pastos tanto naturales como seminaturales, cuya estructura florística y funcional no sólo viene determinada por las condiciones del piso alpino sino también por la acción del pastoreo de los grandes herbívoros (Montserrat 1996).

Para evaluar el efecto del pastoreo en la diversidad de los pastos, en 1992 establecimos dos cercados de exclusión de grandes herbívoros (Fig. 6) sobre dos comunidades con distinta composición florística: *Bromion erecti* y *Nardion strictae*. Durante 22 años se ha monitorizado la abundancia de las especies dentro y fuera de las exclusiones mediante *point intercept*, así como otras variables relacionadas con la fenología y herbivoría. La comparación de las comunidades interior (exclusión) y exterior (control) de las exclusiones ha permitido determinar la variación estructural del pasto ante una hipotética desaparición del pastoreo desde una perspectiva temporal excepcionalmente larga, junto a su asociación a variables climáticas registradas por una estación meteorológica automatizada (García-González y Gómez-García 2013). Contrariamente a lo esperado, la exclusión de grandes herbívoros no ha afectado significativamente a la riqueza de especies. Los cambios importantes en la estructura de la comunidad se refieren a sustituciones entre grupos ecológicos y ocurrieron dentro de las exclusiones durante un breve pero intenso periodo cálido y seco. Fuera de las exclusiones, estos cambios fueron pequeños y reversibles, volviendo la comunidad a una situación más próxima a la original una vez que las condiciones de mayor humedad y frío retornaron (Pardo et al. 2015). El único cambio direccional se observó en la comunidad del *Nardion strictae*, más pobre en nutrientes, donde se apreció un aumento constante en la dominancia de *Nardus stricta* tras la eliminación del pastoreo, lo que equivale a un empobrecimiento del valor pastoral (García-González y Gómez-García 2014). Los efectos a largo plazo del cese del pastoreo en los pastos de alta montaña parecen ser menos importantes y más lentos de lo esperable, aunque podrían acentuarse de actuar sinérgicamente con eventos climáticos secos y cálidos. Por lo tanto, el mantenimiento del pastoreo tradicional puede ser clave para preservar la diversidad y el valor pastoral de las comunidades pascícolas de alta montaña en el escenario actual de cambio climático.

## Detectando pequeños cambios en la diversidad de comunidades de pastos y cumbres

El análisis de la dinámica de hábitats o ecosistemas mediante fotografía aérea o teledetección permite identificar factores importantes en relación a cambios en la productividad y recursos utilizados por el hombre. A esta escala, sin embargo, algunos de los cambios biológicos que se producen dentro de esos hábitats pueden pasar desapercibidos. Esta información es también necesaria para formular medidas de gestión dirigidas al mantenimiento de la biodiversidad.

Un estudio comparativo de la estructura y composición de la comunidad del ecotono entre pastos alpinos y límite superior del bosque entre 1998 y 2009, reveló que un aumento significativo de la cobertura arbórea del 20% al 35% no fue suficiente para desencadenar un cambio significativo en la riqueza y composición de las especies de estratos inferiores a medio plazo (Pardo et al. 2013). Tampoco los pastos supraforestales parecen estar sufriendo fuertes transformaciones en términos de diversidad. A diferencia de los profundos cambios registrados en algunos pastos de laderas con fuerte pendiente y orientadas al sur por la entrada de arbustos o reforestación, el estudio comparativo de la composición y estructura de seis pastos localizados a lo largo de un gradiente altitudinal (1800 – 2700 m s.n.m.), tras ser revisitados 20 años después de su primer inventario, mostró una ausencia de cambios significativos (Pardo 2016). La evolución temporal de los pastos del PNOMP, por tanto, está siendo muy diversa, como corresponde a un sistema natural complejo.



**Figura 6.** Cercado de exclusión para grandes herbívoros a 1900 m de altitud en el PNOMP. Las gráficas corresponden a la evolución temporal dentro (exclusión) y fuera (control) de los cercados, y muestran las abundancias de las gramíneas dominantes: *Festuca nigrescens* (la línea negra corresponde a la comunidad Bromion y la azul a la comunidad Nardion) y *Nardus stricta*, desde 1992 hasta la actualidad. Un periodo excepcionalmente cálido y seco tuvo lugar entre los años 2002 y 2006.

**Figure 6.** Exclusion fenced area for large herbivores located at 1900 m altitude in the PNOMP. Graphs show the gramineae abundance within (exclusion plot) and outside (control plot): *Festuca nigrescens* (black line corresponds to Bromion community and blue to Nardion community) and *Nardus stricta* since 1992 till 2014. An exceptionally warm and dry period occurred between 2002-2006.

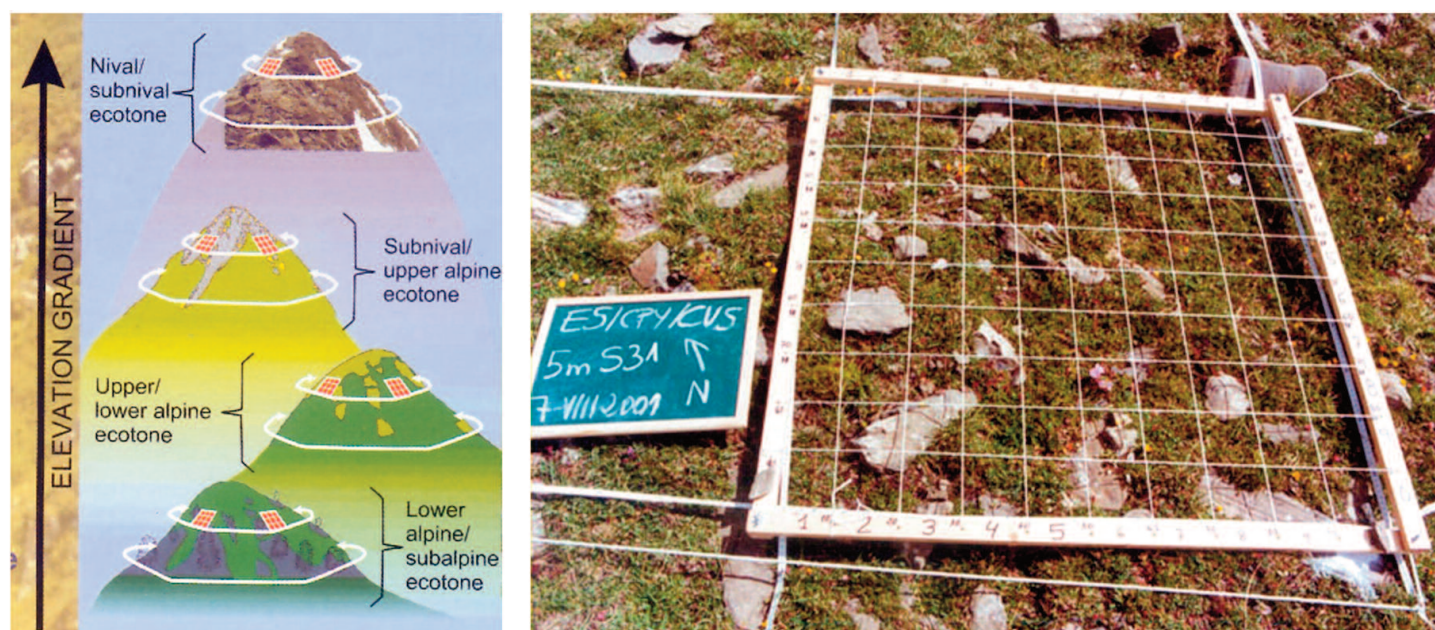
Resultados opuestos encontramos en cuatro cumbres alpinas del PNOMP, donde el proyecto GLORIA (*Global Observation Research Initiative in Alpine Environments*; Fig. 7) ofrece una visión preocupante de los cambios en la biodiversidad de las comunidades alpinas (Pauli et al. 2012). Estos ambientes presentan un alto grado de naturalidad y una rica flora (unas 1000 especies en Europa, de las cuales 250 son endémicas), pero al estar condicionados por las bajas temperaturas se muestran especialmente influidos por el calentamiento climático. Se cuantifica la cobertura y la frecuencia de las plantas vasculares en parcelas permanentes, se registra la “temperatura biológica” a 10 cm de profundidad, y se analizan las características del suelo. La información recogida, tras ser comparada con la de otros muchos macizos europeos, ha permitido descubrir que en las cumbres sólo existen dos estaciones, una favorable –*verano*– cuyo período vegetativo oscila entre medio año a 2242 m y menos de cuatro meses a 3022 m de altitud, y otra desfavorable, un largo *invierno* con el suelo helado. También ha desvelado que si bien en muchas montañas europeas la cara más abrigada es la oriental, donde se alberga un mayor número de especies que en el resto, en el PNOMP es la meridional. Además, las temperaturas mínimas del mes de junio condicionan mucho el desarrollo de la flora, habiéndose demostrado que la temperatura media nocturna de ese mes ha aumentado 1.6 °C entre 2001 y 2008. Las especies adaptadas al frío (criófilas) van siendo sustituidas por otras más termófilas (Gottfried et al. 2012), habiéndose estimado un ascenso medio en su distribución de 2.7 m en la cimas europeas (Pauli et al. 2012).

#### Cambios poblacionales de especies amenazadas e indicadores

En términos operativos, los cambios en los hábitats y el futuro de la biodiversidad dependen de las dinámicas poblacionales de las especies que los forman. Las extinciones de especies son difícilmente detectables en lugares sometidos a bajas perturbaciones antropogénicas como los espacios protegidos, y a la escala temporal a la que suelen desarrollarse los estudios ecológicos. Por ello, obtener tendencias poblacionales puede ser un buen signo de alarma. Esta aproximación se aborda en el PNOMP principalmente a través de especies amenazadas (prioritarias debido a su alto riesgo y a que existe una obligación legal para su vigilancia), y otras más comunes pero con un papel ecológico mucho más relevante como bioindicadores.

La **Tabla 1** recoge un listado de organismos cuyas poblaciones son objeto de seguimiento ecológico en la actualidad: una buena colección de endemismos, especies en límite de distribución, indicadores de la calidad de un hábitat, o de cambios globales. Cada organismo puede requerir un método distinto, por lo que en los últimos años se está realizando un esfuerzo considerable para adaptar protocolos internacionales (lepidópteros, formícidos, macroinvertebrados), o poner a punto protocolos propios (plantas vasculares, anfibios, micromamíferos), que permitan obtener información rigurosamente sólida para modelizar su riesgo de extinción o el efecto de los cambios ambientales en sus dinámicas. En el caso de plantas vasculares se realizan seguimientos de *Androsace cylindrica*, *A. pyrenaica*, *Borderea pyrenaica*, *Calamintha grandiflora*, *Carex bicolor*, *Cypripedium calceolus*, *Galanthus nivalis*, *Pinguicula alpina*, *P. longifolia*, *Petrocoptis crassifolia*, *Polygonum viviparum*, *Ramonda myconi*, *Ranunculus parnassifolius*, *Saxifraga oppositifolia*, *Silene acaulis*, *Thalictrum macrocarpum*, *Thymelaea tinctoria nivalis*, *Thymus vulgaris* y *Vicia argentea*. Generalmente se registran estimas de abundancias en áreas permanentes de seguimiento para generar posteriormente modelos demográficos basados en el método de “aproximación por difusión” (Dennis et al. 1991), un método sencillo en el que con frecuencia participa personal del Parque. En el caso de especies animales (**Tabla 1**), la abundancia y el tamaño poblacional son las variables de estado más utilizadas, pero su estimación puede resultar muy costosa, especialmente si las densidades son bajas y/o las áreas de estudio son muy grandes (MacKenzie y Nichols 2004). Por este motivo, en la última década se han desarrollado métodos analíticos que permiten utilizar los datos de ocupación y proporción de área ocupada por una especie, que son generalmente menos costosos de obtener. La ocupación es la variable elegida en la mayor parte de los seguimientos de los vertebrados del PNOMP (anfibios, micromamíferos, lacértidos, carnívoros).

Las series temporales de las que se dispone son todavía cortas, pero no indican declives severos ni fuertes fluctuaciones poblacionales por el momento. La estabilidad poblacional es la tónica general en decenas de seguimientos, exceptuando el aumento de parejas de quebrantahuesos, la reciente extinción de una población de *Carex bicolor* por la acción de una perturbación natural sobre una pequeña área de ocupación, y el hecho de que bioindicadores como los macroinvertebrados acuáticos y peces sugieren cierta degradación de la calidad del agua en algunos puntos concretos (circo de Soaso en la cabecera del río Arzas).



**Figura 7.** Esquema del protocolo de seguimiento GLORIA en las 4 cimas elegidas en cada cadena montañosa (izda.), y ejemplo de las parcelas utilizadas para la toma de datos en campo (drcha.).

**Figure 7.** GLORIA Monitoring protocol for the four mountain summits selected for each mountain (left). Example of plots designed for data measurement.



**Tabla 1.** Inventario de seguimientos ecológicos en marcha en el PNOMP, en relación a variables ambientales, hábitats, procesos y especies. Se indica además el año de inicio (un guión significa que está actualmente en marcha), frecuencia, objetivo y método general.

**Table 1.** Current ecological monitoring in PNOMP including environmental, habitats, processes and species with the onset year, frequency, objective and general methodology.

TIPO SEGUIMIENTO ECOLOGICO	AÑO INICIO	FRECUENCIA	Objetivo	Método
<b>CLIMA</b>				
Estación meteorológica AEMET (1)	1981-	Registro continuo	Variables climáticas	Manual
Estaciones meteorológicas PNOMP (4)	2005-	Registro continuo	Variables climáticas	Manual
Estación meteorológica AEMET (1)	2015-	Registro continuo	Variables climáticas	Manual
Estación meteorológica automática OAPN (1)	2014-	Registro continuo	Variables climáticas	<a href="#">Programa de seguimiento de Cambio Global</a>
Termómetros suelo proyecto GLORIA (16)	2011-	cada hora	Variables climáticas	Manual
Termómetros miniaturizados tipo ibuttons (60)	2014-	cada 4 horas	Variables climáticas	Manual
<b>ECOSISTEMAS FLUVIALES</b>				
Parámetros físico-químicos	2011-	Trimestral	Calidad aguas	Parámetros físico-químicos e isotópicos
Macroinvertebrados acuáticos	2011-	Anual	Bioindicador calidad aguas	Índice IBMWP
<b>GLACIAR</b>				
Evolución Masa Glaciar Monte Perdido	2011-	Anual	Pérdida de masa	Láser-escáner
<b>HABITATS Y VEGETACIÓN</b>				
Pastos supraforestales	1992, 2012	Plurianual	Diversidad y estructura	Point intercept y parcelas semipermanentes
Exclusiones ganaderas (4)	1992-, 2012	Anual	Diversidad y estructura	Point intercept y parcelas semipermanentes
Límite del bosque	1998, 2009	Plurianual	Diversidad y densificación bosque	Point intercept
Matorralización	2008	Anual	Efecto de quema y desbroce en la dinámica de la comunidad vegetal	Point intercept y parcelas
Diversidad en cimas (GLORIA)	2001-2008-2015	Plurianual	Efecto del cambio climático sobre la biodiversidad	<a href="#">Pauli et al. 2015</a>
Bosques	1992-	Anual	Estado fitosanitario	Observación
Fructificación de fagáceas	2003-	Anual	Recursos para la fauna	Abundancia en estaciones-control
Hábitats de interés comunitario 7240, 8120, 8210, 8220	2013-	Anual	Evolución de su diversidad	Dinámica poblacional de especies representativas
<b>POBLACIONES DE ESPECIES</b>				
Plantas vasculares	2010-	Anual	Efecto de cambios globales sobre la biodiversidad	Protocolos propios. Abundancia en parcelas o transectos permanentes
Lepidópteros	2007-	3 por año	Efecto de cambios globales sobre la biodiversidad	Transecto según el United Kingdom Butterfly Monitoring Scheme (UKBMS)
Formicidos	2008	Plurianual	Efecto de cambios globales en prados	Capturas en pitfalls a lo largo de transectos
Anfibios (Rana pyrenaica...)	2001, 2004, 2007-	Anual	Bioindicador de sistemas acuáticos	Abundancia en 34 puntos de las cuencas
Peces (Trucha común)	2011-	Anual	Efecto de cambios globales sobre la biodiversidad	Pesca eléctrica
Lagartija pirenaica	2013	Anual	Efecto del cambio climático	Ocupación a lo largo de transectos
Quebrantahuesos	1990-	Anual	Riesgos de especies amenazadas	Censos, radioseguimiento, alimentación suplementaria
Buitre leonado, Alimoche, Halcón peregrino	2008	Plurianual	Efecto de cambios globales sobre la biodiversidad	Censos de parejas reproductoras
Águila real	2007-2009	Plurianual	Efecto de cambios globales sobre la biodiversidad	Censos de parejas reproductoras
Lagópodo alpino	2003, 2005, 2008	Plurianual	Efecto del cambio climático	Observación, localización rastros y escuchas
Mochuelo boreal	2003-2011	Anual	Efecto de cambio climático sobre la biodiversidad	Detección de presencia / nidos
Perdiz pardilla	2003, 2005-2006	Plurianual	Efecto de cambios globales sobre la biodiversidad	Observación
Pícidios	2009	Plurianual	Efecto de cambios globales sobre la biodiversidad	Censos mediante observación y escuchas en transectos
Paseriformes alpinos nidificantes	2007-	Anual	Efecto del cambio climático	Proporción de áreas ocupadas según presencia
Quirópteros	2003-2004, 2009-2010	Plurianual	Efecto de cambios globales sobre la biodiversidad	Detección ultrasonidos, capturas, cajas-nido
Ungulados (sarrío, corzo, jabalí)	1987-	Anual	Efecto de cambios globales sobre la biodiversidad	Censos, hozaduras
Mamíferos carnívoros	2007-	Anual	Efecto de cambios globales sobre la biodiversidad	Abundancia en recorridos (IKA), observaciones, rastros y fototrampeo
Micromamíferos (topillo nival)	2010-	Anual	Efecto de cambios globales sobre la biodiversidad	Ocupación mediante trampas Sherman en 20 pedreras
Aves comunes invernantes y reproductoras	2012-	Anual	Efecto de cambios globales sobre la biodiversidad	Protocolos de censos según SACIN y SACRE

## Discusión y conclusiones

Los espacios protegidos son de gran utilidad en los estudios de cambio global, no sólo por su papel como reservorios de geo-biodiversidad, sino también porque su gestión controlada facilita el desarrollo de investigación y posterior análisis de procesos ecológicos. Los actuales geo-ecosistemas del PNOMP son el resultado de procesos que han operado a muy distintas escalas, y todas ellas pueden aportar enseñanzas sobre su dinámica y resistencia ante los motores de cambio global. Una aproximación multiescalar y multidisciplinar está permitiendo evidenciar cambios de muy diversa naturaleza, escala y velocidad: desde los relacionados con cambio climático o cambios socio-económicos acaecidos en las últimas décadas (por ej., retroceso del glaciar y matorralización), hasta los que han requerido diversos siglos (por ej., retroceso de las morrenas en el circo de Marboré y cambios en la escorrentía y la dinámica del lago de Marboré tras la Pequeña Edad del Hielo). No obstante, la complejidad del sistema es tal que no es posible abordarlo de forma completa, por lo que nuestras conclusiones han de considerarse parciales y fragmentadas, piezas sueltas de un complicado puzle.

A escala actual, algunos resultados sugieren por ejemplo que la matorralización avanzará, pero también que la colonización por erizón puede ser un estado transitorio al favorecer el desarrollo de otra especie común: el boj. Otros indican una alta probabilidad de que el bosque subalpino de pino negro continúe extendiéndose y recupere, en las próximas décadas, su espacio ancestral recubriendo algunos pastos, tal y como se ha observado en otras zonas del Pirineo (Ameztegui et al. 2010). No obstante, la simple superposición del límite del bosque a partir de los años 60 en el PNOMP no muestra un claro avance como sería esperable, sino más bien una densificación generalizada por debajo del límite del bosque. Si bien la recuperación del bosque supondrá una muestra de resiliencia, implicará también un empobrecimiento de la biodiversidad que contienen los pastos, y un cambio en los servicios ecosistémicos que ofrece el parque, sustituyéndose por ejemplo parte de la diversa oferta en alimentos para el ganado por almacenamiento de CO<sub>2</sub>. Es esperable que en pocas décadas aumenten las superficies boscosas, lo que beneficiará a la fauna y flora asociada a bosques de pino negro, pero también puede modificar el régimen de perturbaciones, por ejemplo aumentando la probabilidad de incendios.

Hemos comprobado también que las generalizaciones son arriesgadas: bosques como los abetales, propios de zonas húmedas y productivas, podrían verse amenazados por episodios de decaimiento debido a los eventos de sequía y temperaturas elevadas que son esperables bajo el actual marco climático. Similares eventos climáticos parecen actuar de forma sinérgica con la desaparición del ganado en pastos supraforestales, lo que podría alterar la estabilidad registrada durante las dos últimas décadas en un escenario futuro de calentamiento climático. Por otro lado, los cambios registrados en los índices vegetales (NDVI y NDII) en las últimas décadas ponen en evidencia un cambio en la calidad de los pastos de consecuencias aún no conocidas para su resiliencia (Gartzia et al. 2016).

La integración de resultados parciales sobre la evolución reciente del PNOMP relativiza la importancia de las percepciones que cada estudio proporciona por separado. Los seguimientos ecológicos actuales muestran que los dos principales motores de cambio global (clima y cambios de usos de suelo), están teniendo gran trascendencia en la fisonomía y la estructura de algunos de los ambientes más icónicos y frecuentes del parque (glaciar, biodiversidad en cumbres alpinas, bosques en su límite superior...), pero también sugieren una importante variabilidad espacial en los procesos y evidencian que los cambios observados no siempre siguen los paradigmas establecidos. A modo de ejemplos, en el PNOMP conviven pastos matorralizados y pastos muy estables, y las especies amenazadas mantienen dinámicas poblacionales estables. ¿Resultados contradictorios, o simplemente una compleja realidad que frena nuestras posibilidades de predecir el futuro del Parque? La valoración general de los cambios requiere de un análisis conjunto de los factores asociados y su distribución espacial.

Hemos de ser conscientes, además, de que la monitorización ecológica del PNOMP se inició hace relativamente poco tiempo (menos de 15 años), y es posible que hayamos perdido la oportunidad de detectar los mayores cambios a pequeña escala desde que se produjo el más importante abandono de los usos del suelo en la primera mitad del siglo XX, junto al drástico incremento posterior en la afluencia de visitantes.

Tampoco podemos olvidar que el seguimiento de un simple elemento, organismo o hábitat, puede no indicarnos mucho más que la situación de su inmediato entorno, mientras que el efecto del cambio de algunas variables puede tener consecuencias de largo alcance. Las sinergias entre los cambios en la criosfera, hidrosfera y biosfera en alta montaña, por ejemplo, tendrán importantes consecuencias en el ciclo hidrológico y en la cubierta vegetal, y consecuentemente también en el mundo animal y de la flora y fauna edáficas. Los estudios experimentales ayudan a esclarecer relaciones causa-efecto, pero no siempre son posibles. En el caso de la dinámica de pastos supraforestales están permitiendo concluir que la matorralización no puede ser controlada exclusivamente a través de quemas ni tampoco exclusivamente a través de la actividad ganadera, puesto que ambas han estado tradicionalmente unidas en la formación de pastos subalpinos. Aunque el calentamiento climático promueve el proceso de la matorralización, la ralentización del mismo puede ser lograda a través una gestión adecuada, promoviendo el pastoreo, corredores entre pastos que han quedado aislados, y favoreciendo la integración de ciencia y sociedad en su gestión.

En el horizonte próximo nos acecha una posible agudización del calentamiento global (último informe del IPCC, Stocker et al. 2013), y la continuación de los cambios de usos del suelo hasta que se establezca la dinámica demográfica de los pueblos próximos, sometidos a un fuerte envejecimiento. Aunque nos hallamos inmersos en una reciente pero intensa carrera por pronosticar el futuro, cada vez somos más conscientes de las limitaciones de la modelización (por ej., Engler et al. 2010), una herramienta que requerirá de evidencias reales para validar sus pronósticos. A medida que se genera información empírica vamos completando el rompecabezas de los procesos geomorfológicos y ecológicos, y hasta la fecha faltan todavía muchas piezas por encajar. Pero aún disponiendo del mejor de los sistemas y diseños de seguimiento ecológico, ¿cómo podemos comparar los cambios que detectamos a escala de los últimos años o décadas, con los de los últimos siglos o miles de años?, ¿son las tendencias que registramos con la monitorización actual, representativas de la dinámica de los ecosistemas, paisajes y procesos superficiales del PNOMP desde la Pequeña Edad de Hielo o después del impacto antrópico medieval? Para resolver estas cuestiones fundamentales necesitamos complementar el esfuerzo paralelo de monitorización y reconstrucción del pasado más allá del periodo instrumental. Es preciso diseñar y desarrollar programas de investigación multidisciplinarios que permitan, desde su inicio, integrar el estudio de los procesos a escalas temporales distintas, con protocolos diferentes y con resolución variable. Por ejemplo, avanzar en el conocimiento de la evolución de poblaciones actuales y fósiles mediante estudios de biología molecular y modelos de distribución aplicables a datos de monitorización y palinológicos. O modelizar cómo los cambios recientes en la cobertura vegetal, las actividades humanas y el clima, han afectado a la hidrología del macizo kárstico, y cómo lo pudieron hacer en el pasado reciente. Sabemos que el PNOMP no siempre ha sido como lo vemos actualmente, y que su situación ha sido probablemente muy variable en respuesta a los ajustes que se han producido frente a las distintas situaciones ambientales. Los paisajes y ecosistemas del PNOMP fueron distintos para los habitantes de los siglos más cálidos de la época medieval (del IX al XIV), los pastores de las épocas frías de la Pequeña Edad de Hielo (del XV a finales del XIX), nuestros bisabuelos de principios del siglo XX, y los senderistas y turistas de las últimas décadas. La monitorización actual es una herramienta irremplazable para obtener conocimientos que nos ayuden a enfrentarnos al futuro inmediato y gestionar la evolución de los sistemas naturales.

Predecir la resistencia o resiliencia de los sistemas frente a los cambios es complicado no sólo por la falta de conocimientos disponibles sino también porque ahora sabemos que las respuestas pueden no ser tan rápidas o lineales como se esperaba. La compleja topografía de la montaña, los procesos hidrológicos en la criosfera-hidrosfera, las formas de vida que configuran la diversidad, hacen que no todos los ambientes ni organismos respondan de igual manera a los mismos motores de cambio, y que por tanto sea necesario seguir profundizando y experimentando en los sistemas de estudio antes de aventurar predicciones simplistas basadas en modelos a gran escala, e implementando medidas de gestión nuevas o corregidas conforme avanzamos en el conocimiento. La observación de los procesos que actúan en el PNOMP ha de incluir un esfuerzo continuado de monitorización multiescalar y multidisciplinar de los distintos componentes de la geo- hidro- crio- y biosfera, sin olvidar el componente humano, combinando instrumentalización y trabajo de campo. Entender la complejidad supone conectar las interacciones que existen entre el erizón invasor en laderas soleadas y el hábitat de la perdiz nival, entre el paciente crecimiento de los pinos negros que sobrevuelan los quebrantahuesos, el ibón de Marboré que recibe la fusión de las nieves, el glaciar de Monte Perdido que se derrite, la rápida mudanza del goteo de las cuevas, la floración de las plantas terciarias y la efímera visita de los turistas...

## Agradecimientos

Los resultados presentados proceden de proyectos subvencionados por el Organismo Autónomo de Parques Nacionales: 125/2010 (C.L. Alados), 387/2011 (J.J. Camarero), 430/211 (M.B. García), 258/2011 (A. Moreno), 533S/2012 (P. Mata y M.I. Riera-deval), 623/2012 (M.I. Riera-deval), 083/2009 (B. Valero), 844/2013 (J.I. López-Moreno). Otros Proyectos europeos, nacionales y regionales que han contribuido a la información contenida: CGL2011-27259; FW7 ENV.2009.2.1.3.2 LEDDRA; FW7 COST Action ES1203 (C.L. Alados), LIFE+12 NAT/ES/000180 y CGL2010-21642 (M.B. García), CGL2011-27753-C02-01 (J.M. García-Ruiz), Proyectos GLORIA-EUROPE y GLORIA-ARAGÓN (L. Villar y J.L. Benito, Gobierno de Aragón). Los autores agradecen también a la Dirección y personal del Parque Nacional de Ordesa y Monte Perdido, así como a P. Abadía, A.I. Acín, A. Aldezábal, J. Bosco, P.A. Bravo, J. Fanlo, E. Ginés, M. Grasa, M. Jarne y S. Lapesa por su apoyo y dedicación.

## Referencias

- Aldezábal, A. 2001. *El sistema de pastoreo del Parque Nacional de Ordesa y Monte Perdido (Pirineo Central, Aragón). Interacción entre la vegetación supraforestal y los grandes herbívoros*. Consejo Protección Naturaleza de Aragón, Zaragoza. España.
- Améztegui, A., Brotons, L., Coll, L. 2010. Land-use changes as major drivers of mountain pine (*Pinus uncinata* Ram.) expansion in the Pyrenees. *Global Ecology and Biogeography* 19: 632–641.
- Benito Alonso, J.L. 2006. *Catálogo florístico del Parque Nacional de Ordesa y Monte Perdido (Sobrarbe, Pirineo central aragonés)*. Colección Pius Font i Quer, n.º 4. 391 pp. Institut d'Estudis Ilerdencs. Lérida. España.
- Camarero, J.J., Gutiérrez, E. 2004. Pace and pattern of recent treeline dynamics: response of ecotones to climatic variability in the Spanish Pyrenees. *Climatic Change* 63: 181–200.
- Camarero, J.J., Gazol, A., Galván, J.D., Sangüesa-Barreda, G., Gutiérrez, E. 2015. Disparate effects of global-change drivers on mountain conifer forests: warming-induced growth enhancement in young trees vs. CO<sub>2</sub> fertilization in old trees from wet sites. *Global Change Biology* 21:738–749.
- Dennis, B., Munholland, P. L., Scott, J.M. 1991. Estimation of growth and extinction parameters for endangered species. *Ecological Monographs* 61: 115–143.
- Engler, R., Randin, C.F., Thuiller, W., Dullinger, S., Zimmermann, N. E., Araújo, M.B. et al. 2010. 21<sup>st</sup> century climate change threatens mountain flora unequally across Europe. *Global Change Biology* 17:2330–2341.
- Fillat, F., García-González, R., Gómez, D., Reiné, R. 2008. *Pastos del Pirineo*. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Madrid. España.
- Galván, D., Camarero, J.J., Gutiérrez, E. 2014. Seeing the trees for the forest: drivers of individual growth responses to climate in *Pinus uncinata* mountain forests. *Journal of Ecology* 102: 1244–1257.
- Galván, D.J., Büntgen, U., Ginzler, C., Grudd, H., Gutiérrez, E., Labuhn, I., Camarero, J.J. 2015. Drought-induced weakening of growth-temperature associations in high-elevation Iberian pines. *Global and Planetary Change* 124: 95–106.
- García-González, R., Gómez-García, D. 2013. Relaciones entre integral térmica y fenología en especies de pastos de puerto del Pirineo Central. En: Olea, L. et al. (eds.) *Los pastos: nuevos retos, nuevas oportunidades*, pp. 41–48. SEEP, Badajoz. SEEP, Badajoz. España.
- García-González, R., Gómez-García, D. 2014. Cambios del valor eco-pastoral tras ausencia de pastoreo en pastos de *Bromion* y *Nardion* del Pirineo Central. En: Busqué, J. Salcedo, G. Serrano, E. Mora, M.J. Fernández, B. (eds.) *Pastos y PAC 2014-2020*, pp. 25–32. CIFA - SEEP, Potes (Cantabria), España.
- García-Ruiz, J.M., Lasanta, T., Ruiz-Flano, P., Ortigosa, L., White, S., González, C., Martí, C. 1996. Land-use changes and sustainable development in mountain areas: a case study in the Spanish Pyrenees. *Landscape Ecology* 11: 267–277.
- García-Ruiz, J.M., Palacios, D., de Andrés, N., Valero-Garcés, B.L., López-Moreno, J.I., Sanjuán, Y. 2014. Holocene and 'Little Ice Age' glacial activity in the Marboré Cirque, Monte Perdido Massif, Central Pyrenees. *The Holocene* 24: 1439–1452.
- García-Ruiz, J.M. López-Moreno, J.I., Lasanta, T., Vicente-Serrano, S., González-Sampériz, P., Valero-Garcés, B., Sanjuán, Y., Beguería, S., Nadal-Romero, E., Lana-Renault, N., Gómez-Villar, A. 2015. Los efectos geoecológicos del cambio global en el Pirineo central español: una revisión a distintas escalas espaciales y temporales. *Pirineos* 170:e12. <http://dx.doi.org/10.3989/Pirineos.2015.170005>
- Gartzia, M., C. L. Alados, Pérez-Cabello, F. 2014. Assessment of the effects of biophysical and anthropogenic factors on woody plant encroachment in dense and sparse mountain grasslands based on remote sensing data. *Progress in Physical Geography* 38:201–217.
- Gartzia, M., Pérez-Cabello, F., Bueno, C.G., Alados, C.L. 2016. Physiognomic and physiologic changes in mountain grasslands in response to environmental and anthropogenic factors. *Applied Geography* 66:1–11.
- Gottfried, M., Pauli, H., Futschik, A., Akhalkatsi, M., Barancok, P., Benito Alonso, J.L., Villar, L. et al. 2012. Continent-wide response of mountain vegetation to climate change. *Nature Climate Change* 2: 111–115.
- Harrison, P.A., Vandewalle, M., Sykes, M.T., Berry, P.M., Bugter, R., de Bello, F., Feld, C.K. et al. 2010. Identifying and Prioritising Services in European Terrestrial and Freshwater Ecosystems. *Biodiversity and Conservation* 19: 2791–2821.
- Hewitt, J.E, Thrush, S.F., Lundquist, C. 2010. *Scale dependence in Ecological Systems*. eLS. John Wiley and Sons Ltd, Chichester. <http://www.els.net> [doi: 10.1002/9780470015902.a0021903]
- Komac, B., Alados, C.L., Camarero, J.J. 2012. Influence of topography on the colonization of subalpine grasslands by *Echinospartum horridum*. *Arctic and Alpine Research* 43, 601–611.
- Komac, B., Kéfi, S., Escós, J., Alados, C.L. 2013. Modeling shrub encroachment in alpine grasslands under different environmental and management scenarios. *Journal of Environmental Management* 121:160–169.
- Lambán, L.J., Jódar, J., Custodio, E., Soler, A., Sapriza, G., Soto, R., 2015. Isotopic and hydrogeochemical characterization of high-altitude karst aquifers in complex geological settings. The Ordesa and Monte Perdido National Park (Northern Spain) case study. *Science of The Total Environment* 506–507: 466–479.
- López-Moreno J.I., J. Revuelto, Rico, I., Chueca-Cía, J., Julián, A., Serreta, A., Serrano, E., Vicente-Serrano, S.M., Azorín-Molina, C., Alonso-González, E., García-Ruiz, J.M. 2015. Accelerated wastage of the Monte Perdido Glacier in the Spanish Pyrenees during recent stationary climatic conditions. *The Cryosphere Discuss.*, 9, 5021–5051.
- MacKenzie, D.I., Nichols, J.D. 2004. Occupancy as a surrogate for abundance estimation. *Animal Biodiversity and Conservation* 27: 461–467.
- Magurran, A., Baillie, S., Buckland, S., Dick, J., Elston, D., Scott, E. et al. 2010. Long-term datasets in biodiversity research and monitoring: assessing change in ecological communities through time. *Trends in Ecology and Evolution* 25:574–582.
- Montserrat, P. 1996. El pastoreo crea y fomenta los paisajes de montaña más estables. En: XXXVI Reunión Científica de la Sociedad Española para el Estudio de los Pastos, 119–120. Gobierno de La Rioja. Consejería de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Rural, La Rioja. España.

- Morellón, M., Pérez-Sanz, A., Corella, J.P., Büntgen, U., Catalán, J., González-Sampériz, P. et al. 2012. A multi-proxy perspective on millennium-long climate variability in the Southern Pyrenees. *Climate of the Past* 8: 683–700.
- Moreno, A., Pérez, A., Frigola, J., Nieto-Moreno, V., Rodrigo-Gámiz, M., Martrat et al. 2012. The Medieval Climate Anomaly in the Iberian Peninsula reconstructed from marine and lake records. *Quaternary Science Reviews* 43: 16–32.
- Nichols, J., Williams, B. 2006. Monitoring for conservation. *Trends in Ecology and Evolution*, 21(12), 668–673.
- Nuche, P. 2016. *Efecto de las condiciones ambientales en la dinámica sucesional y en la estructura de la vegetación de montaña mediterránea*. Tesis doctoral. Universidad Autónoma, Madrid. España.
- Oliva-Urcia, B., Moreno, A., Valero-Garcés, B.L., Mata, P., Grupo Horda, 2013. Magnetism and environmental changes from terrestrial core of the lake Marboré, Parque Nacional de Ordesa y Monte Perdido (Huesca). *Cuadernos de Investigación Geográfica* 39 (1): 117-140.
- PAGES2k Consortium 2013. Continental-scale temperature variability during the past two millennia. *Nature Geosciences* 6: 339–346.
- Pardo, I. 2016. *Distribution and dynamics of multiple components of plant diversity in a high mountain area: the Ordesa-Monte Perdido National Park*. Tesis Doctoral, Universidad de Barcelona. Barcelona, España.
- Pardo, I., Camarero, J.J., Gutiérrez, E., García, M.B. 2013. Uncoupled changes in tree cover and field layer vegetation at two Pyrenean treeline ecotones over 11 years. *Plant Ecology and Diversity* 6: 355-364.
- Pardo, I., Doak, D.F., García-González, R., Gómez, D., García, M.B. 2015. Long-term response of plant communities to herbivore exclusion at high elevation grasslands. *Biodiversity and Conservation* 24: 3033–3047.
- Pauli, H., Gottfried, M., Dullinger, S., Abdaladze, O., Akhalkatsi, M., Benito Alonso, J. L., Villar, L. et al. 2012. Recent plant diversity changes on Europe's mountain summits. *Science* 336: 353-355.
- Pauli, H., Gottfried, M., Lamprecht, A., Niessner, S., Rumpf, S., Winkler, M., Steinbauer, K., Grabherr, G., (coord. and eds). 2015. *Manual para el trabajo de campo del proyecto GLORIA. Aproximación al estudio de las cimas. Métodos básico, complementarios y adicionales. 5ª edición*. GLORIA-Coordinación, Academia Austriaca de Ciencias y Universidad de Recursos Naturales y Ciencias de la Vida, Viena, Austria. Edición en español a cargo de Benito Alonso, J.L. y Villar, L. [doi.: 10.2777/37575].
- Rodríguez Fernández, R., Robador Moreno, A. 2014. *Parque Nacional de Ordesa y Monte Perdido*. Guía Geológica. Colección Guías Geológicas de Parques Nacionales. Editorial Everest. Madrid, España. 215 pp.
- Sala, O. E., Chapin, F. S., Armesto, J. J., Berlow, E., Bloomfield, J., Dirzo, R. et al. 2000. Global biodiversity scenarios for the year 2100. *Science* 287(5459):1770–1774.
- Salazar-Rincón, A., Mata-Campo, P., Rico-Herrero, M.T., Valero-Garcés, B., Oliva-Urcia, B., Ibarra, P. et al. 2013. El paleolago de La Larri (Valle de Pineta, Pirineos): significado en el contexto del último máximo glacial en el Pirineo. *Cuadernos de Investigación Geográfica* 39 (1): 97-116.
- Sangüesa-Barreda, G., Camarero, J.J., Oliva, J., Montes, F. and Gazol, A. 2015. Past logging, drought and pathogens interact and contribute to forest dieback. *Agricultural and Forest Meteorology* 208: 85-94.
- Spehn, E.M., Rudmann-Maurer, K., Körner, C. 2012. Mountain biodiversity. *Plant Ecology and Diversity* 4(4): 301-302.
- Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., Midgley, P.M. 2013. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, Estados Unidos.
- Valero-Garcés, B., Oliva-Urcia, B., Moreno, A., Rico, M., Mata, P., Salazar, A., Rieradevall, M.I., García-Ruiz, J.M., Chueca, J., González-Sampériz, P., Pérez, A., Salabarnada, A., Pardo, A., Sancho, C., Barreiro, F., Bartolomé, M., García-Prieto, E., Gil-Romera, G., López-Merino, L., Sevilla-Callejo, M., Tarrats, P. 2013. Dinámica glacial, clima y vegetación en el Parque Nacional de Ordesa y Monte Perdido durante el Holoceno. En: Ramírez, L., Asensio, B. (eds.). *Proyectos de Investigación en Parques Nacionales (2009-2012)*, pp: 7-37. Organismo Autónomo Parques Nacionales, Madrid, España.