



HAL
open science

Ecosistemas sensibles de alta montaña: lagos y turberas

David Amouroux, Laure Gandois, Didier Galop, Gael Le Roux, Lluís Camarero, Jordi Catalan, Jesus Miguel Santamaria, David Elustondo, Sheila Izquieta Rojano, Alberto de Diego, et al.

► To cite this version:

David Amouroux, Laure Gandois, Didier Galop, Gael Le Roux, Lluís Camarero, et al.. Ecosistemas sensibles de alta montaña: lagos y turberas. El cambio climático en los Pirineos: impactos, vulnerabilidades y adaptación El cambio climático en los Pirineos: impactos, vulnerabilidades y adaptación, 58-65, OPCC-CTP, 2018. hal-03185782

HAL Id: hal-03185782

<https://hal.science/hal-03185782>

Submitted on 30 Mar 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



El Cambio climático en los Pirineos: impactos, vulnerabilidades y adaptación

Bases de conocimiento para la futura estrategia
de adaptación al cambio climático en los Pirineos



OPCC-CTP (2018). El cambio climático en los Pirineos: impactos, vulnerabilidades y adaptación
Bases de conocimiento para la futura estrategia de adaptación al cambio climático en los Pirineos

ISBN: 978-84-09-06268-3

Coordinación y edición de textos: Juan Terrádez e Idoia Arauzo

Diseño de la portada: La Page Original

Edición gráfica y maquetación: Collserola

Foto de portada: © OPCC

Aviso legal

El contenido de esta publicación no refleja necesariamente las opiniones oficiales del Observatorio Pirenaico del Cambio climático u otras instituciones de la Unión Europea. Ni el Observatorio Pirenaico del Cambio Climático ni ninguna persona que actúe en nombre del OPCC es responsable del uso que pueda hacerse de la información contenida en este informe.

Aviso de copyright



Reconocimiento-NoComercial (CC BY-NC)

Esta licencia permite a otros entremezclar, ajustar y construir a partir de su obra con fines no comerciales, y aunque en sus nuevas creaciones deban reconocerle su autoría y no puedan ser utilizadas de manera comercial, no tienen que estar bajo una licencia con los mismos términos.

Descarga el informe completo y el resumen ejecutivo en ES, FR, CAT o EN en el portal de información del Observatorio Pirenaico del Cambio Climático: <https://opcc-ctp.org/>

Informe sobre el cambio climático en los Pirineos

Desde su lanzamiento en 2010 bajo la presidencia de Midi-Pyrénées, el Observatorio Pirenaico del Cambio Climático de la Comunidad de Trabajo de los Pirineos (CTP) ha trabajado analizando la vulnerabilidad al cambio climático de las distintas poblaciones, sectores sociales, económicos y naturales del espacio pirenaico transfronterizo, a través del desarrollo de metodologías adecuadas para ello y bajo el prisma de la cooperación. Durante 2018 y siguiendo la línea de trabajo del Observatorio, la CTP ha elaborado un informe en el que se actualiza el conocimiento sobre las repercusiones del cambio climático en el territorio pirenaico transfronterizo. Este informe recoge las bases científicas sobre los impactos del cambio climático y su repercusión en el territorio, así como un compendio de recomendaciones sectoriales de adaptación formuladas en consecuencia. Estas bases de conocimiento son indispensables para orientar las políticas en materia de adaptación al cambio climático de manera más eficaz, para aprovechar las oportunidades emergentes y maximizar las sinergias positivas con otras políticas sectoriales. Su valor añadido reside sin lugar a duda en el espíritu de cooperación que ha marcado tanto su concepción como su redacción. En él han participado alrededor de 100 científicos y expertos de referencia provenientes de ambas vertientes de los Pirineos. Han colaborado en su redacción así como en los varios procesos de revisión que otorgan a este documento un amplio consenso científico. Es necesario subrayar que sin la larga trayectoria de cooperación, trabajo en red y proyección internacional con organismos como la Convención de los Alpes, la Convención de los Cárpatos o la Agencia Europea de Medio Ambiente, sería imposible crear documentos de referencia como el presente informe. La visión de este informe es la propia del Observatorio, que concibe los Pirineos como una única "bioregión" que no entiende de límites administrativos y cuyos sistemas socioeconómicos y biofísicos presentan una especial vulnerabilidad al cambio climático. Las evidencias científicas recogidas en este informe ponen de manifiesto, lo mismo que otros estudios ya han demostrado en otros territorios: las zonas de montaña están experimentando aumentos de temperatura superiores a las zonas llanas y por lo tanto los impactos del cambio climático son más intensos. En concreto para los Pirineos ya se están observando impactos en todos los sectores naturales y socioeconómicos como la desaparición acelerada de ecosistemas sensibles y elementos iconográficos como los glaciares; la alteración del ciclo de vida de muchas especies, entre ellas algunas endémicas; la incidencia del cambio climático en los riesgos naturales, en las actividades ligadas al turismo, en la agricultura o los cambios observados en el ciclo hidrológico. El cambio climático se posiciona como un factor de estrés añadido que agrava los problemas ya conocidos en el territorio pirenaico como la despoblación, los cambios de usos del suelo o la falta de relevo generacional en el sector primario. Desde la CTP se entiende la lucha contra el cambio climático y la adaptación a sus impactos como instrumentos transversales que ofrecen multitud de oportunidades para abordar los desafíos de los Pirineos que son a la vez desafíos globales. De esta manera, la CTP, desde la acción local, contribuye a la consecución del Objetivo 13, Acción por el Clima, de la Agenda 2030 de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas.



D. Francisco Javier Lambán Montañés
Presidente de la CTP

| | |
|--|-----------|
| 1. Clima y Variabilidad Climática en los Pirineos | 6 |
| 1.1 El clima del periodo glacial y la deglaciación | 6 |
| 1.1.1 El clima del Holoceno | 6 |
| 1.1.2 Los últimos 2000 años | 7 |
| 1.2 El clima actual | 10 |
| 1.2.1 Evolución de la temperatura media anual y estacional | 10 |
| 1.2.2 Evolución de la precipitación anual y estacional | 11 |
| 1.2.3 Evolución del manto de nieve en los Pirineos | 13 |
| 1.3 Proyecciones de cambio climático en los Pirineos | 16 |
| 2. El Impacto del CC en los sectores biofísicos | 18 |
| 2.1 El cambio climático durante el Holoceno | 18 |
| 2.2 Biodiversidad de montaña: fauna | 22 |
| 2.2.1 Cambios en la productividad y abundancia de las especies | 22 |
| 2.2.2 Modificaciones del ciclo de vida (alteraciones fenológicas) y de las interacciones entre especies | 24 |
| 2.2.3 Modificaciones en la distribución geográfica | 26 |
| 2.2.4 Alteraciones de las interacciones ecológicas y del funcionamiento de los ecosistemas | 30 |
| 2.2.5 Mayor riesgo de invasión y/o expansión de especies exóticas | 32 |
| 2.2.6 Impacto en la interconexión entre las redes de espacios protegidos | 33 |
| 2.2.7 Conclusiones y recomendaciones | 33 |
| 2.3 Biodiversidad de montaña: flora | 36 |
| 2.3.1 Alteraciones fisiológicas y cambios en la productividad y abundancia de las especies | 37 |
| 2.3.2 Cambios del ciclo vital (cambios fenológicos) | 37 |
| 2.3.3 Alteraciones ecológicas y del funcionamiento de los ecosistemas | 38 |
| 2.3.4 Cambios en la composición y en las interacciones entre especies en la comunidad ecológica | 38 |
| 2.3.5 Vulnerabilidades y servicios ecosistémicos | 41 |
| 2.3.6 Conclusiones y recomendaciones | 42 |
| 2.4 Bosques | 44 |
| 2.4.1 Los impactos potenciales del cambio climático en la diversidad de comunidades vegetales y sobre la distribución de las especies forestales | 44 |
| 2.4.2 Alteración de la productividad de los bosques y papel de los bosques como sumideros de carbono | 47 |
| 2.4.3 El impacto del cambio climático sobre el papel de los bosques en la atenuación de los riesgos naturales | 49 |
| 2.4.4 Alteración de las condiciones de salud de los bosques y posible desequilibrio con las comunidades de agentes patógenos | 51 |
| 2.4.5 Impacto del cambio climático sobre el riesgo de incendios forestales en los Pirineos | 54 |
| 2.4.6 Conclusiones y recomendaciones | 56 |
| 2.5. Ecosistemas sensibles de alta montaña: lagos y turberas | 58 |
| 2.5.1 Características de los lagos y turberas pirenaicos | 58 |
| 2.5.2 Procesos en lagos y turberas de alta montaña en un contexto de cambio climático | 59 |
| 2.5.3 Impactos previstos | 62 |
| 2.5.4 Principales desafíos | 64 |
| 2.5.5 Conclusiones y recomendaciones | 64 |
| 2.6 Ciclo hidrológico y recursos hídricos | 66 |
| 2.6.1 Cambios en las aguas superficiales: aportación anual | 68 |
| 2.6.2 Cambios en las aguas superficiales: régimen mensual | 70 |
| 2.6.3 Cambios en las aguas subterráneas y en las surgencias | 70 |
| 2.6.4 Cambios en las características físico-químicas de las masas de agua | 73 |
| 2.6.5 Cambios en la composición biológica de las masas de agua | 74 |
| 2.6.6 Conclusiones y recomendaciones para la adaptación | 76 |

| | |
|---|------------|
| 3. Impacto del cambio climático en los sectores socioeconómicos | 78 |
| 3.1. Turismo | 78 |
| 3.1.1 Reducción del atractivo turístico invernal de las estaciones de esquí | 78 |
| 3.1.2 Alteración de elementos iconográficos del paisaje Pirenaico | 82 |
| 3.1.3 Incremento del riesgo de las infraestructuras turísticas a los fenómenos hidrológicos, geológicos y eventos climáticos extremos | 83 |
| 3.1.4 Prolongación de la estación de turismo de montaña | 83 |
| 3.1.5 Conclusiones y recomendaciones | 85 |
| 3.2. Cultivos agrícolas y agropastoralismo de montaña | 87 |
| 3.2.1 Impactos y vulnerabilidades en el sector agrícola | 87 |
| A. Desplazamiento de las áreas de idoneidad de los cultivos | 87 |
| B. Cambios en los rendimientos de los cultivos | 88 |
| C. Expansión de plagas y enfermedades agrícolas | 92 |
| 3.2.2 Pastos naturales de montaña: impactos y vulnerabilidades | 94 |
| A. Cambios en la producción y la calidad de los pastos | 94 |
| B. Alteraciones en la composición florística y de la diversidad | 95 |
| 3.2.3 Sector ganadero extensivo: Impactos y vulnerabilidades | 96 |
| A. Reducción del bienestar animal y de la producción ganadera | 96 |
| B. Nuevas zoonosis y difusión de enfermedades del ganado | 97 |
| 3.2.4 Conclusiones y recomendaciones | 98 |
| 3.3 Energía | 102 |
| 3.3.1 Disminución de la capacidad de producción de energía hidroeléctrica | 102 |
| 3.3.2 Disminución de la eficiencia en la producción de energía termoeléctrica | 104 |
| 3.3.3 Cambio climático y energías renovables | 104 |
| 3.3.4 Variación estacional de la demanda energética | 106 |
| 3.3.5 Incremento del riesgo de daños a las infraestructuras energéticas | 107 |
| 3.3.6 Conclusiones y recomendaciones | 108 |
| 3.4 Riesgos naturales | 111 |
| 3.4.1 Aumento de los fenómenos meteorológicos extremos | 111 |
| 3.4.2 Aumento de la frecuencia de inundaciones y crecidas | 113 |
| 3.4.3 Aumento de los deslizamientos y desprendimientos de rocas | 115 |
| 3.4.4 Mayores riesgos relacionados con la degradación del permafrost | 115 |
| 3.4.5 Avalanchas | 117 |
| 3.4.6 Diseñar una estrategia de adaptación a los riesgos naturales en el futuro | 118 |
| 3.4.7 Conclusiones y recomendaciones | 119 |
| Bibliografía | 124 |
| 1. Clima y Variabilidad Climática en los Pirineos | 124 |
| 1.1. El clima del periodo glacial y la deglaciación | 124 |
| 1.2. El clima actual | 125 |
| 1.3. Proyecciones de cambio climático en los Pirineos | 125 |
| 2. El Impacto del CC en los sectores biofísicos | 128 |
| 2.1 El cambio climático durante el Holoceno | 128 |
| 2.2 Biodiversidad de montaña: fauna | 128 |
| 2.3 Biodiversidad de montaña: flora | 131 |
| 2.4 Bosques | 133 |
| 2.5 Ecosistemas sensibles de alta montaña: lagos y turberas | 136 |
| 2.6 Ciclo hidrológico y recursos hídricos | 137 |
| 3. Impacto del cambio climático en los sectores socioeconómicos | 140 |
| 3.1 Turismo | 140 |
| 3.2. Cultivos agrícolas y agropastoralismo de montaña | 142 |
| 3.3 Energía | 143 |
| 3.4 Riesgos naturales | 143 |

2.5. Ecosistemas sensibles de alta montaña: lagos y turberas

Coordinadores: Blas Valero Garcés (IPE-CSIC)

Autores y Coautores: David Amouroux (U. Pau- Pays de L'Adour), Laure Gandois (EcoLab, CNRS, UPS, INPT), Didier Galop (EcoLab, CNRS, UPS, INPT), Gaël Le Roux (EcoLab, CNRS, UPS, INPT), Lluís Camarero (CEAB-CSIC), Jordi Catalán (CSIC-UAB), Jesús Miguel Santamaría (UNAV), David Elustondo (UNAV), Sheila Izquieta-Rojano (UNAV), Alberto de Diego (UPV-EHU), Ana Moreno (IPE-CSIC), Fernando Barreiro-Lostres (IPE-CSIC), Pilar Mata-Campo (IGME), Pablo Corella (IFQSH-CSIC), Penélope González-Sampérez (IPE-CSIC), Anna Avila Castells (CREAF-UAB), Olaia Liñero, (UPV-EHU), Marisol Felip (CREAF-UB).

2.5.1. Características de los lagos y turberas pirenaicos

Los lagos y turberas de alta montaña en los Pirineos son elementos icónicos del paisaje pirenaico, vulnerables a los recientes cambios climáticos y la creciente presión antrópica. Más de mil lagos de alta montaña (más de 0.5 ha en los pisos alpino y montano), la mayoría entre 2000 y 2500 m de altitud, han sido inventariados en los Pirineos en función de distintos criterios de extensión y altitud (Castillo-Jurado, 1992). Los 17 lagos mayores (con un área mayor de 0.3 km²) suman una superficie de 7.87 km². De acuerdo con el inventario de Castillo-Jurado (1992), el 75% de los lagos tiene una superficie de menos de 0.04 km² y el área de la cuenca de drenaje varía entre 0.1 km² (Gentianes, Gave de Pau) y 32.6 km² (Baños de Panticosa, Gállego), con una media de 1.67 km². Con respecto a la profundidad, se distinguen dos tipos, los relativamente someros (< 10-15 m de profundidad máxima) y los profundos (> 15 m). En total existen 90 lagos con profundidades mayores de 25 m, de los cuales 47 superan los 40 m.

Las turberas son ecosistemas que se caracterizan por la acumulación de materia orgánica derivada de la vegetación en condiciones de saturación de agua. En los Pirineos, la mayoría son de tipo "fen", alimentadas por precipitación, aguas superficiales y/o subterráneas. Su formación depende de la topografía y las condiciones climáticas e hidrológicas. La mayoría de las turberas pirenaicas se generaron después de la última deglaciación y han continuado acumulando materia orgánica hasta la actualidad. No existe un inventario completo de las turberas de los Pirineos, aunque son menos numerosas que en otras montañas

RESUMEN

Los lagos y turberas de alta montaña son elementos icónicos del paisaje de los Pirineos muy vulnerables al cambio climático y la creciente presión antrópica. Durante milenios, han sostenido una compleja biodiversidad y cumplido una función de almacenamiento de carbono, además de proporcionar recursos hídricos, hábitats para el pastoreo y más recientemente recursos para el turismo. Su conservación en el marco de un desarrollo sostenible de la montaña es un reto y una oportunidad para concienciarnos de los efectos del cambio global en territorios considerados prístinos.

de clima más atlántico (Heras *et al.*, 2017). En particular, la información sobre las turberas pequeñas (menos de 1 ha) es muy limitada, a pesar de ser más abundantes, especialmente a mayores alturas, asociadas a pequeños lagos alpinos. Turberas bien desarrolladas ocurren en los Pirineos navarros (Atxuri, Belate, Gesaleta y Baltsagorrieta) y en la vertiente francesa (Bernadouze y Col d'Ech). Los datos existentes sobre el espesor de turba acumulada en estos ecosistemas en los últimos miles de años se limitan a unos pocos sitios, de manera que no se dispone de estimaciones fiables del reservorio de carbono acumulado en las mismas. La dinámica de estos ecosistemas originados por los procesos glaciares del Cuaternario está fuertemente condicionada por los procesos criosféricos en las cuencas de drenaje (innivación y fusión de la nieve, dinámica asociada de los neveros y del permafrost). Las características de estos lagos y turberas (elevada altitud y radiación solar con altas dosis de UV, ultraoligotrofia debido a la escasez de nutrientes, aguas muy diluidas, bajas temperaturas, presencia de una capa de hielo durante varios meses, etc.) los hacen muy sensibles a factores climáticos (regímenes de temperaturas y precipitaciones, vientos, etc) (Figura 2.5.1). Por una parte son "centinelas" de los cambios que están sucediendo en el territorio pirenaico, dada su gran sensibilidad a las fluctuaciones climáticas y ambientales y a las alteraciones de sus cuencas de recepción. Por otra parte archivan en sus sedimentos las complejas señales del paisaje, el sistema acuático y los procesos biológicos y abióticos y cómo han evolucionado en los últimos siglos o milenios.

Los lagos y turberas proporcionan servicios al territorio pirenaico más allá de su carácter de indicadores del cambio global. Durante las últimas décadas, la economía de muchas zonas de montaña se ha vuelto cada vez más dependiente de las actividades turísticas relacionadas con los deportes de invierno y con el

excursionismo de verano. Algunos de los elementos singulares de la alta montaña como glaciares, ibones, turberas y ecosistemas de tundra alpina son elementos dinamizadores de las economías locales, con variadas figuras de protección y medidas de conservación en los distintos territorios pirenaicos. Dada la gran importancia de los recursos hídricos de alta montaña y de estos elementos singulares del paisaje para múltiples sectores (turismo, agricultura, generación de energía, medio ambiente, suministro de agua, etc.), la calidad de los servicios proporcionados por lagos y turberas en el futuro dependerá directamente de las respuestas de la criosfera-hidrosfera- biosfera al cambio climático en el territorio pirenaico. La alta montaña es el granero de agua, la fábrica de energía y el patio de recreo de todos los territorios pirenaicos, una región con crecientes necesidades de agua y recursos energéticos para consumos agrícolas y humanos.

2.5.2. Procesos en lagos y turberas de alta montaña en un contexto de cambio climático

Los procesos biogeoquímicos en los lagos y turberas de alta montaña están determinados por el carácter extremo de estos hábitats (Catalan *et al.*, 2006).

Agencias territoriales, confederaciones hidrográficas y ministerios de España, Francia y Andorra mantienen programas de análisis para comprobar el estado ecológico de algunos lagos en los Pirineos (ver CHE³¹ y ACA³².) Las aguas de alta montaña son en general muy diluidas, con muy bajo contenido en sales disueltas, oligotróficas y con una elevada transparencia. El tipo de cuenca y el sustrato geológico son determinantes de la composición química de las aguas (formaciones carbonatadas versus silíceas) y del ciclo del carbono (presencia de carbono orgánico disuelto asociado a la abundancia de suelos en la cuenca). Los ciclos biogeoquímicos están fuertemente controlados por el sustrato (alcalinidad, ciclo del carbono), la micro- y macrobiota (nutrientes) y por la deposición atmosférica (nutrientes, contaminantes). En particular, el pH de las aguas es uno de los parámetros que controla la presencia de algunas microalgas y macrófitas. El pH depende de la alcalinidad y está relacionado con el sustrato de la cuenca (Catalan *et al.*, 2006).

De acuerdo con un estudio llevado a cabo en verano del año 2000 (Catalan *et al.*, 2006), el 70 % de los lagos pirenaicos son ultraoligotróficos (TP < 4.7 µg L⁻¹), el 22 % oligotróficos (4.7 < TP < 9.3 µg L⁻¹) y el 6 % son mesotróficos (9.3 < TP < 31 µg L⁻¹). Durante

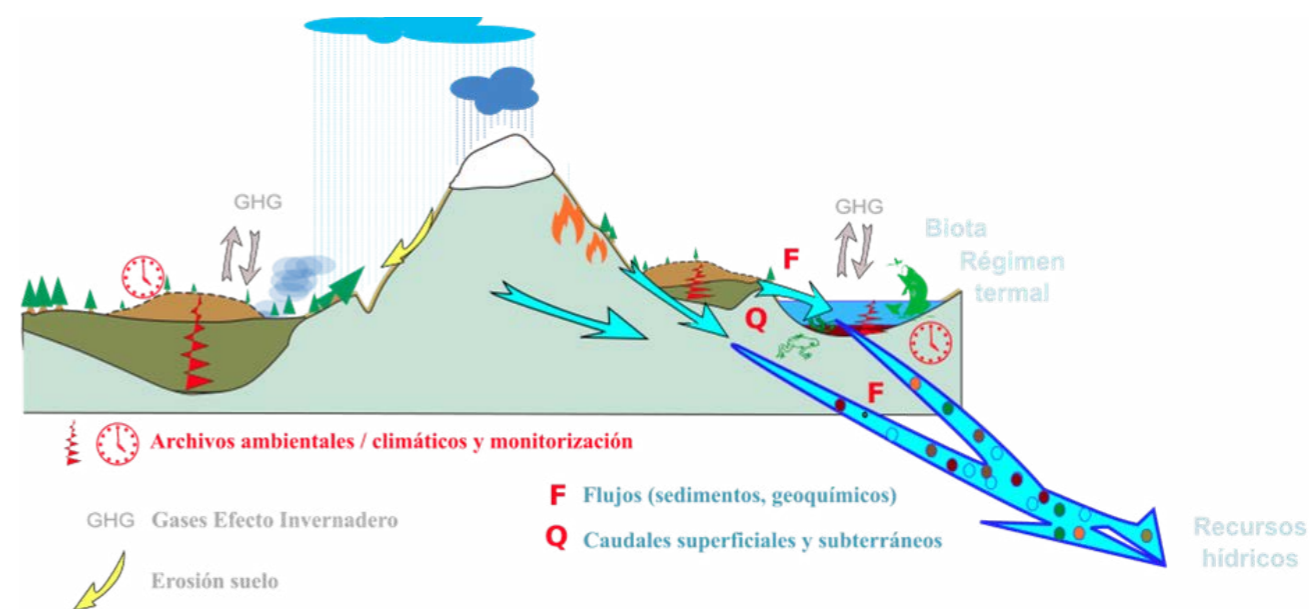


Figura 2.5.1. Ciclos biogeoquímicos en lagos y turberas de alta montaña

(31) <http://www.chebro.es/>

(32) <http://aca-web.gencat.cat/>

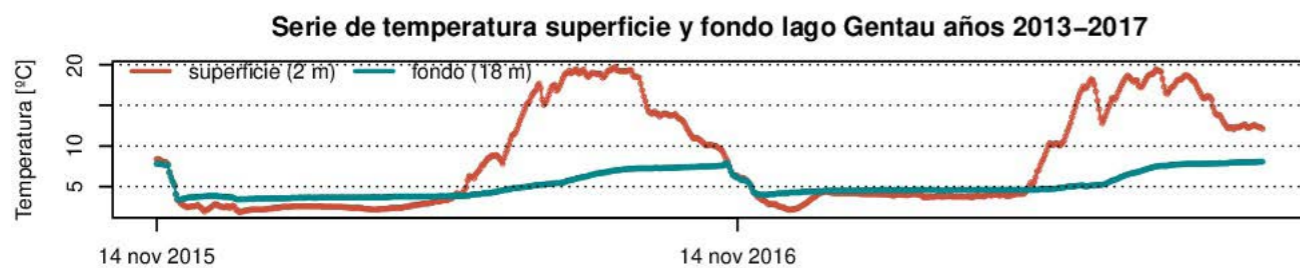
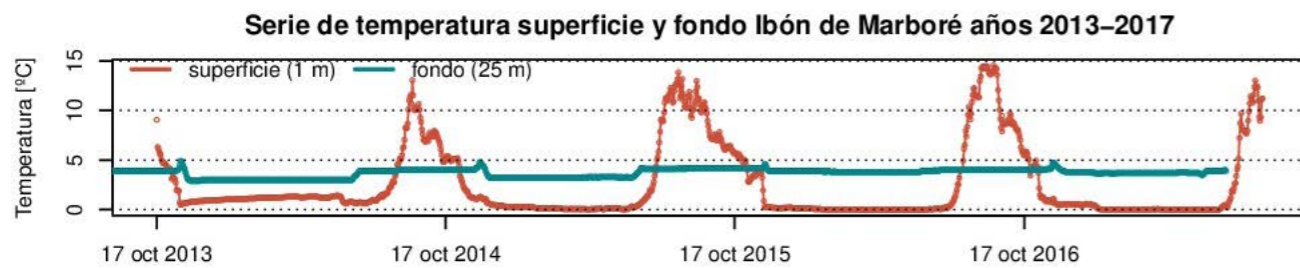
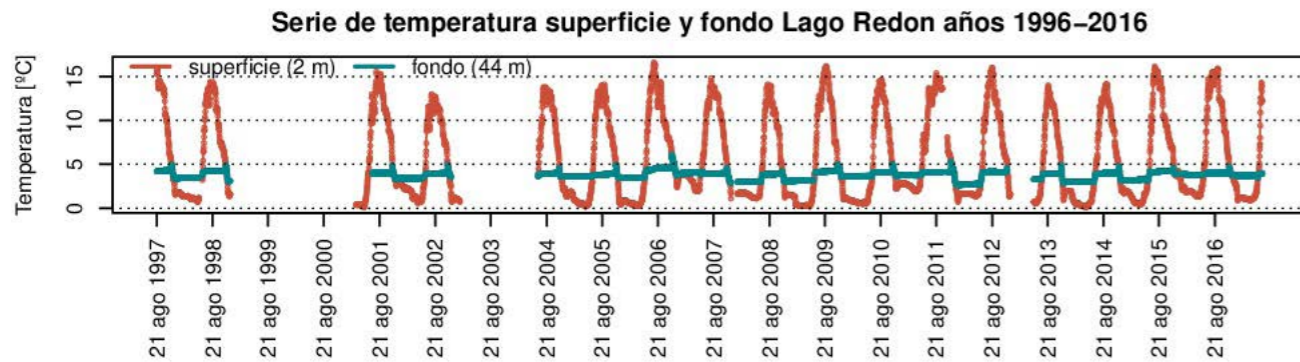


Figura 2.5.2. Perfil de temperatura y de fondo en el Lago Redon (1969-2016), Marboré (2013-2017) y Lago Gentau (2013-2017). Fuente: a partir de datos del proyecto CLAM-IGME y REPLIM.

la estación sin hielo, la penetración de la luz llega hasta el fondo en más del 75 % de los lagos, lo que permite el desarrollo de biota autótrofa. La radiación ultravioleta puede ser muy elevada en estos sistemas, aunque sus efectos en los microorganismos apuntan tendencias diversas. Los lagos y turberas actúan como acumuladores de contaminantes orgánicos e inorgánicos en sus sedimentos (metales pesados) (Catalan *et al.*, 1993; Camarero, 2003; Le Roux *et al.*, 2016). Más del 75 % de los lagos estudiados muestran factores de enriquecimiento para metales por encima del 1.5 (Camarero, 2003), demostrando el efecto de la contaminación atmosférica en la alta montaña, mayor en los Pirineos centrales y orientales que en los occidentales (Figura 2.5.3A).

Los sedimentos acumulados en numerosos lagos de los Pirineos muestran que la deposición atmosférica de metales pesados ha sido importante en la época romana, medieval y contemporánea asociada a la actividad minera y metalúrgica y ha decrecido desde finales del siglo XX con la reducción de las gasolinas con Pb (Camarero *et al.*, 1998). Por el contrario, otros contaminantes orgánicos han aumentado su deposición en las últimas décadas (Arellano *et al.*, 2015). Además, los lagos pirenaicos han sufrido una acidificación moderada debida a la lluvia ácida producida durante la segunda mitad del siglo XX (Camarero, 2017). Los ciclos físicos anuales en los lagos y turberas de altura muestran una gran variabilidad

estacional, dependiendo de la disponibilidad hídrica, régimen térmico estacional y periodos de presencia y ausencia de su cubierta de hielo (Figura 2.5.2 A). Los ciclos biológicos siguen el mismo patrón estacional, con distintas fases de máxima productividad de las comunidades del fitoplancton (Camarero *et al.*, 1999; Felip y Catalan, 2000; Ventura *et al.*, 2000). Sólo en algunos lagos se dispone de series de mediciones limnológicas plurianuales (Redon, desde 1996; Marboré desde 2013; Sánchez *et al.*, 2017). Las turberas son ecosistemas esenciales en la hidrología y el ciclo del carbono en zonas de montaña (Parish *et al.*, 2008). En ellas se almacena carbono a través de la acumulación de materia orgánica y actúan como filtros (contaminantes, materia orgánica, partículas de suelo) que aseguran la calidad del agua en las cabeceras de las cuencas hidrológicas. A pesar de su relativa reducida extensión, aparecen en numerosas cuencas y mantienen una biodiversidad única. Además, las turberas de *Sphagnum* del Pirineo están en el límite meridional de su distribución geográfica y son, por lo tanto, particularmente sensibles a los cambios climáticos y antrópicos. El ciclo del carbono en las turberas de alta montaña es complejo y no está cuantificado. Las turberas son los ecosistemas terrestres más efectivos como almacenes de carbono. Las turberas de zonas templadas contienen siete veces más carbono por hectárea que cualquier otro ecosistema. Las turberas han acumulado carbono a lo largo de milenios, pero se desconoce la tasa de acumulación

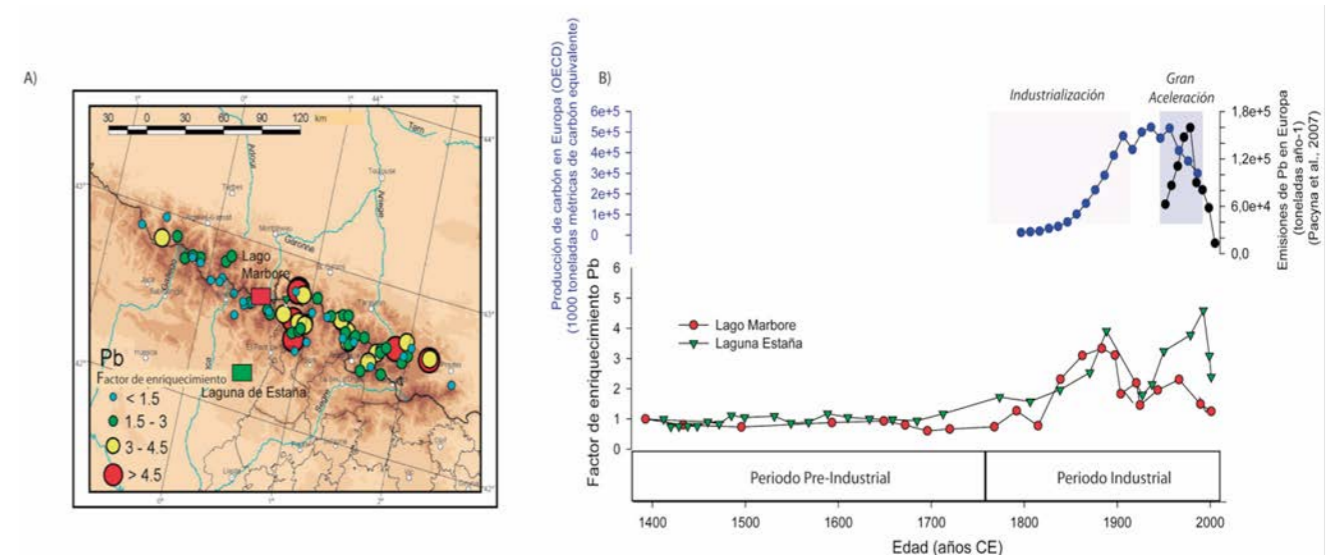


Figura 2.5.3. A. Distribución geográfica del factor de enriquecimiento de Pb en sedimentos superficiales de lagos del Pirineo. B. Factores de enriquecimiento de metales pesados en el ibón de Marboré y el lago de Estaña durante los últimos 600 años. Fuente: Camarero, 2003.

natural a lo largo del Holoceno (últimos 11700 años), del Antropoceno (últimos 8000 años) y las posibles variaciones en el siglo XX debidas al calentamiento global. A escalas temporales menores y controladas por procesos ambientales (inundaciones, sequías, fuegos, etc), las turberas pueden potencialmente actuar como emisores de CH₄ y CO₂ a la atmósfera o a las cuencas hidrológicas (como carbono orgánico disuelto o particulado). Finalmente, los microambientes de estos ecosistemas contienen una elevada biodiversidad. Para conocer la resiliencia de estos ecosistemas a los cambios climáticos y a las presiones antrópicas locales (deforestación, fuegos para aumentar los pastos, etc) es necesario identificar y cuantificar los procesos a escala anual y estacional.

2.5.3. Impactos previstos

Las zonas de mayor altitud de todas las montañas del mundo son áreas donde la incidencia del cambio climático es especialmente elevada. Los principales impactos previstos en los lagos y turberas de alta montaña y sus cuencas de recepción están relacionados con la alteración de sus características físico-químicas y biológicas como respuesta a la variación de la disponibilidad hídrica y al aumento de las temperaturas. A estas elevaciones es importante no sólo el calentamiento directo del agua de los lagos, sino también la duración de la cubierta de hielo del lago y el manto nival en su cuenca. Entre otros procesos, son esperables cambios en el ciclo de hielo y deshielo, en el tipo y abundancia de determinadas comunidades y en la composición química de las aguas (alcalinidad). En las cuencas de recepción, la degradación de los neveros y la desaparición de las áreas con suelos congelados estacionalmente (permafrost) llevará muy probablemente a cambios en la hidrología superficial y a la pérdida de comunidades vegetales relictas (ver capítulos 2.6 y 2.3). Asociadas a lagos y turberas, se encuentran las comunidades vegetales de humedales y neveros, así como muchas especies boreoalpinas en el límite de su distribución, que por ello resultan especialmente vulnerables a cualquier cambio térmico o del patrón de precipitaciones. Algunos de los servicios ecosistémicos (calidad y cantidad de agua; turismo) también podrían verse afectados. Se han detectado cambios en el estatus trófico de lagos de alta montaña en la mayoría de montañas del mundo (Elser *et al.*, 2009; Camarero y Catalan, 2012) y las causas se han atribuido tanto a cambios en el régimen térmico y de vientos causados por el cambio climático como a cambios en la deposición atmosférica de nitrógeno y fósforo relacionados con los cambios en la circulación sinóptica de las masas de aire. El previsible aumento en la radiación UV en zonas de montaña podría tener un efecto importante

en las comunidades planctónicas de los lagos como se ha demostrado en estudios en el Himalaya y los Alpes (Sommaruga *et al.*, 1999). Estudios en los Alpes austríacos han demostrado que el efecto combinado de estos factores hace que los lagos en la franja de altitud entre 1500 y 2000 m sean ultrasensibles a los cambios de temperatura y precipitación, ya que es en este rango de altitud donde los cambios en la cubierta de hielo y el manto nival son más pronunciados. En general, los lagos más profundos tienen una mayor inercia térmica y les cuesta más calentarse y enfriarse que a los someros. Como consecuencia, es esperable que los lagos profundos respondan más lentamente a los cambios físicos (gradientes de temperatura y densidad), químicos (salinidad, alcalinidad, pH, nutrientes) y biológicos (productividad primaria, composición de las comunidades biológicas) que los someros.

Los impactos previstos en los lagos y turberas del Pirineo debidos a la variabilidad climática se superponen a los causados por las actividades antrópicas. Desde un punto de vista histórico, los lagos de los Pirineos, a pesar de su localización remota, han sufrido importantes impactos antrópicos en los últimos milenios. La deposición de metales pesados se remonta a la época romana. Los situados a menor altura, han visto sus cuencas de recepción deforestadas desde la época medieval y sometidas a mayor presión ganadera (González-Sampérez *et al.*, 2016). La introducción de algunas especies de peces ha sido una práctica habitual desde hace siglos (primeras referencias en el siglo XV, Miró y Ventura, 2013). Durante el siglo XX los impactos principales han sido la construcción de presas hidroeléctricas y el aumento del turismo y las infraestructuras relacionadas con los deportes de invierno y verano.

Los impactos del CC en estos ecosistemas pirenaicos están asociados principalmente a los cambios en los regímenes de temperaturas. La tendencia general hacia un aumento de la temperatura media en los Pirineos (unos 2°C desde el final de la Pequeña Edad del Hielo y con una tasa de 0.2°C/década desde 1950) y la disminución del periodo con cubierta de hielo supone un cambio esencial en el régimen térmico estacional de los lagos. La mayor parte de los estudios indican que el calentamiento térmico ha causado una menor acumulación y una menor duración del manto de nieve en la mayor parte de las montañas del mundo, siendo muy probable que este efecto se acelere de forma muy marcada en el futuro. Algunos modelos (Schneider *et al.*, 2010) predicen que la temperatura del agua superficial de los lagos (epilimnion) podría aumentar en más de 10°C durante el siglo XXI, respecto a las temperaturas registradas hasta la fecha?observaciones disponibles. Estas proyecciones de cambio en el

régimen hidrológico, cubierta de hielo y temperatura del agua exceden las variaciones experimentadas en estos lagos durante los últimos 11700 años (Holoceno). En varios lagos pirenaicos estudiados durante los últimos siglos (Arreo, Basa de la Mora, Marboré, Montcortès, Redon) se han documentado cambios importantes en el flujo de sedimentos, en la flora (asociaciones de algas diatomeas) y fauna (micro y macroinvertebrados) al final de la Pequeña Edad del Hielo (finales del siglo XIX) y en las últimas décadas. Las causas de estos cambios son complejas y pueden incluir factores climáticos (aumento de temperatura) y antrópicos (mayor deposición atmosférica de nutrientes). El lago Redon es uno de los mejor estudiados y muestra una tendencia clara al aumento de la temperatura (acelerada en las últimas décadas) a lo largo del siglo XX (Catalan *et al.*, 2002; III informe CCC, 2016). Estos cambios de temperatura, particularmente mayores en el verano y el otoño, han favorecido el desarrollo de algunas especies de diatomeas planctónicas de floración otoñal (*Fragilaria nanana* y *Cyclotella pseudostelligera*) y también de

algunos crisófitos que forman los quistes en primavera. La duración de la cubierta de hielo controla también directamente el tipo de comunidades de crustáceos planctónicos (Catalan *et al.*, 2009). La falta de series temporales largas que registren la dinámica en el pasado reciente de estos ecosistemas dificulta asignar los cambios observados en los últimos años a fluctuaciones climáticas, impacto antrópico o las esperables sinergias entre ambos factores. Existen otros efectos indirectos del cambio climático derivados de la fusión de los glaciares y de los suelos permanentemente helados (permafrost), en particular, la liberación de metales traza o contaminantes orgánicos persistentes y el aumento de la movilización de la materia orgánica y contaminantes asociados (Bacardit y Camarero, 2010). Además de la contaminación heredada y del continuado impacto de algunos metales traza, los efectos del cambio climático pueden amplificar tanto su removilización en los reservorios de estos ecosistemas como aumentar sus tasas de deposición (Le Roux *et al.*, 2016).



Figura 2.5.4. Impactos previsibles en lagos y turberas de montaña debidos al cambio climático y a las actividades humanas.

En las turberas los principales impactos esperables del CC son: la degradación del ecosistema, pérdida de superficie inundada, la inversión del efecto sumidero de carbono, y pérdida de servicios eco-sistémicos. Estos cambios podrían alterar la capacidad de estos ecosistemas para actuar como almacenes de carbono, reguladores de la cantidad y calidad de las aguas y salvaguardar la biodiversidad. El aumento de la variabilidad en las precipitaciones en alta montaña podría incrementar la frecuencia e intensidad de las sequías e inundaciones, con posibles cambios en las áreas inundadas de las turberas (ver capítulo 2.6). El aumento de la temperatura también podría prolongar el periodo productivo al aumentar la duración de la estación de crecimiento. También la tasa de descomposición de la turba podría aumentar con el incremento de las temperaturas, incrementando como consecuencia las emisiones de CH₄ y CO₂. La fusión del permafrost también podría provocar un incremento de las emisiones de CH₄ y produciendo un descenso de la concentración de carbono orgánico disuelto en los ríos. Los cambios en la hidrología también podría afectar tanto a la acumulación como a la descomposición de la turba y como consecuencia a la emisión de gases de efecto invernadero, ya que las superficies secas emiten menos CH₄, y más N₂O y CO₂, al contrario que las inundadas. El ascenso altitudinal del límite del bosque como consecuencia del aumento de las temperaturas podría llevar a una expansión del bosque en las zonas de turberas abiertas, resultando en una reducción del albedo y un refuerzo positivo en el calentamiento global.

Un aumento en la torrencialidad podría incidir en un aumento de la tasa de erosión de las turberas, que además podría verse amplificado por el drenaje de las mismas y el efecto del sobrepastoreo. Periodos de sequías más intensos podrían conllevar un aumento en la frecuencia de los incendios y en su intensidad (ver capítulo 2.4), aunque muy probablemente las actividades humanas sigan siendo la principal causa de los incendios también en futuro.

Los efectos combinados de los cambios climáticos con los cambios locales en la hidrología tendrán consecuencias importantes para la distribución y la ecología de las plantas y animales que habitan las turberas o las utilizan. Las actividades humanas aumentan la vulnerabilidad de las turberas al cambio climático. En particular, el drenaje, quema o sobrepastoreo amplificará las emisiones de carbono

2.5.4. Principales desafíos

Los principales desafíos para entender y evaluar los efectos del cambio climático en los lagos y turberas de alta montaña de los Pirineos están relacionados con la complejidad de los procesos bióticos y abióticos en estos ecosistemas, las incertidumbres de los modelos empleados, la falta de series temporales largas que registren la variabilidad natural de estos ecosistemas y nuestra capacidad para poner en práctica medidas de gestión. Uno de los principales retos es identificar y evaluar los impactos asociados al cambio climático y la creciente presión antrópica en estos ecosistemas. Por otra parte, hay que reducir las incertidumbres sobre los mayores riesgos, posibles efectos negativos y futuras presiones sobre los ecosistemas de alta montaña de los Pirineos. La falta de información detallada de las características de estos ecosistemas (desde inventarios detallados hasta cuantificación de los procesos biogeoquímicos) impide conocer la resiliencia de estos sistemas de montaña frente a las presiones del cambio climático y antrópico. Finalmente, estos ecosistemas han de incluirse en la gestión integral del territorio para garantizar su conservación y el uso sostenible de los recursos de montaña.

2.5.5. Conclusiones y recomendaciones

A pesar de la lejanía de los principales focos de actividades humanas, el impacto del cambio climático en los sistemas lacustres y turberas de alta montaña es difícil de distinguir de los efectos de las actividades antrópicas (turismo, deposición de nutrientes, uso de recursos hídricos, etc...). Aunque el impacto humano pueda ser determinante en algunos casos, el aumento de la temperatura puede poner a estos sistemas de alta montaña en una situación de mayor riesgo, al someter a las comunidades biológicas a mayor nivel de stress. Desde el punto de vista de la biota, la plasticidad fenotípica de las comunidades lacustres y de las turberas les puede permitir adaptarse mejor a las fluctuaciones climáticas y ambientales. Es importante analizar los posibles impactos desde un punto de vista holístico que incluya tantos los factores climáticos como los antrópicos, a escala global (deposición de nutrientes, contaminación) como local (efectos del turismo específico de cada zona). La adaptación y mitigación de los efectos del cambio climático en los sistemas lacustres y turberas de alta montaña precisa entender los efectos asociados al Cambio Global para poder reducirlos en la medida de lo posible.

Los lagos y turberas del Pirineo son elementos singulares reconocidos y valorados por la ciudadanía y que pueden servir para incentivar su participación tanto en su seguimiento y conservación como en la comprensión de los impactos del Cambio Global en áreas de montaña.

Entre las medidas generales para una gestión sostenible de los lagos y turberas y su adaptación a los posibles efectos negativos del cambio global destacamos las siguientes:

Medidas soft³³

- Desarrollar grupos de trabajo multidisciplinares, transfronterizos y estables a largo plazo, integrados por los representantes de todos los grupos de interés (ayuntamientos, empresas de turismo, empresas hidroeléctricas, autoridades regionales, científicos, asociaciones ecologistas, ONGs, etc) que orienten el debate sobre los efectos del cambio climático – y antrópico- en estos ecosistemas vulnerables a través de modelos participativos de observación.

- Establecer y mantener redes de observación y monitorización detallada de estos ecosistemas y promover en su seno proyectos integrados con la participación de todos los agentes del territorio.

- Incluir en los planes de ordenación de los espacios naturales los riesgos asociados al cambio climático.

Medidas verdes³⁴

- Potenciar un turismo ecológico con el mínimo impacto en espacios protegidos y la máxima integración de la ciudadanía en su conservación.

- Desarrollar programas educativos a nivel local, regional y transfronterizo para explicar los servicios ecosistémicos y su capacidad de actuar como sumidero de carbono, su capacidad natural de retención de agua, así como sus funciones de protección de la biodiversidad de montaña y la protección frente a los fenómenos erosivos.

Medidas grises³⁵

- Ofrecer incentivos para la adecuación de las empresas de turismo de montaña a los objetivos de conservación sostenible y manejo de estos ecosistemas.

IDEAS CLAVE

- Los lagos y turberas son ecosistemas icónicos del Pirineo, pero muy vulnerables. Su conservación ofrece una oportunidad para la concienciación ciudadana sobre los retos del cambio climático y la creciente presión antrópica.

- Para gestionar los efectos del cambio climático en los lagos y turberas de alta montaña del Pirineo necesitamos estrategias de monitorización que nos permitan conocer mejor los complejos procesos que se desarrollan en estos ecosistemas y disminuir las incertidumbres de los modelos y así poder mejorar nuestra capacidad para llevar adelante políticas consensuadas de gestión sostenible.

(33) Las medidas Soft o medidas no estructurales para reducir o paliar los efectos negativos del cambio climático. Esta categoría de medida está típicamente representada por los estudios de investigación enfocados a cubrir lagunas de conocimiento o para enriquecer las bases de conocimiento sobre el cambio climático, sus impactos y los sectores más vulnerables. También entra en esta categoría el desarrollo de metodologías y sistemas específicos para reducir riesgos derivados del cambio climático (ej. Desarrollo de un early warning System transfronterizo para la gestión de las olas de calor en el Macizo).

(34) Las medidas verdes o basadas en los servicios ecosistémicos: esta tipología de medida incluye todas las medidas, buenas prácticas, estudios o iniciativas que tengan como principio el uso de los servicios ecosistémicos procurados por los distintos recursos naturales para paliar los efectos negativos del cambio climático (ej. prácticas silviculturales conservativas para incrementar la capacidad de los bosques del pirineo para reducir los riesgos hidrogeológicos).

(35) Las Medidas Grey o infraestructurales, son todas aquellas que basan su acción paliativa en la construcción o implantación de elementos infraestructurales concretos (ej. Construcción de diques en las zonas habitadas de alto riesgo de inundaciones torrenciales).

- Forest Ecology and Management, 258(8), 1735-1750.
- Spiecker, H., Mieliäinen, K., Köhl, M., & Skovsgaard, J. P. (1996). Growth Trends in European Forests—Studies From 12 Countries. European Forest Institute Research Report 5
- Soubeyroux, J. M., Kitova, N., Blanchard, M., Vidal, J. P., Martin, E., & Dandin, P. (2012). Caractérisation des sécheresses des sols en France et changement climatique: Résultats et applications du projet ClimSec. La Météorologie, 78, p-21.
- Thapa, B., Holland, S. M., & Absher, J. D. (2004). The relationship between wildfires and tourist behaviors in Florida: an exploratory study.
- Villiers, T. (2016). Guide de gestion des forêts Pyrénéennes à rôle de protection. Office National des Forêts. 9200-16-GUI-SAM-058.

2.5 Ecosistemas sensibles de alta montaña: lagos y turberas

- Arellano, L., P. Fernández, R. Fonts, N. L. Rose, U. Nickus, H. Thies, E. Stuchlík, L. Camarero, J. Catalan, and J. O. Grimalt. 2015. Increasing and decreasing trends of the atmospheric deposition of organochlorine compounds in European remote areas during the last decade. *Atmos. Chem. Phys.* 15:6069-6085.
- Bacardit, M. and L. Camarero. 2010. Modelling Pb, Zn and As transfer from terrestrial to aquatic ecosystems during the ice-free season in three Pyrenean catchments. *Science of The Total Environment* 408:5854-5861.
- Camarero, L., P. Masqué, W. Devos, I. Ani-Ragolta, J. Catalan, H. C. Moor, S. Pla, and J. A. Sanchez-Cabeza. 1998. Historical variations in lead fluxes in the Pyrenees (NE Spain) from a dated lake sediment core. *Water, Air, Soil Pollut.* 105:439-449.
- Camarero, L., Felip, M., Ventura, M., Bartumeus, F. & Catalan, J. (1999) The relative importance of the planktonic food web in the carbon cycle of an oligotrophic mountain lake in a poorly vegetated catchment (Redó, Pyrenees). *J.Limnol.*, 58, 203-212.
- Camarero, L. y J. Catalán. 2012. Atmospheric phosphorus deposition may cause lakes to revert from phosphorus limitation back to nitrogen limitation. *Nat Commun* 3:1118.
- Camarero, L. 2017. Atmospheric Chemical Loadings in the High Mountain: Current Forcing and Legacy Pollution. Pages 325-341 in J. Catalan, J. M. Ninot, and M. Aniz, editors. *High Mountain Conservation in a Changing World*. Springer International Publishing.
- Catalan, J.; Barbieri, M. G.; Bartumeus, F. [et al.] (2009). Ecological thresholds in European alpine lakes. *Freshwater Biology*, 54, p. 2494-2517.
- Catalan, J.; Pla, S.; Rieradevall, M. [et al.] (2002) Lake Redo ecosystem response to an increasing warming in the Pyrenees during the twentieth century. *Journal of Paleolimnology*, 28, p. 129-145.
- Catalan et al. 1993. Chemical composition of disturbed and undisturbed high mountain lakes in the Pyrenees: a reference for acidified sites. *Wat.Res.* 27:133-141.
- Catalan, et al 2006. High mountain lakes: extreme habitats and witnesses of environmental changes. *Limnetica* 25:551-584.
- Felip, M. & Catalan, J. (2000) The relationship between phytoplankton biovolume and chlorophyll in a deep oligotrophic lake: decoupling in their spatial and temporal maxima. *J.Plankton Res.*, 22, 91-105.
- Heras, P., Infante Sánchez, M., Pontevedra-Pombal, X & Novoa-Muñoz, J.C. 2017. Mires and Peatland of Europe. Spain
- Elser, J. J., T. Andersen, J. S. Baron, A.-K. Bergstrom, M. Jansson, M. Kyle, K. R. Nydick, L. Steger, and D. O. Hessen. 2009. Shifts in Lake N:P Stoichiometry and Nutrient Limitation Driven by Atmospheric Nitrogen Deposition. *Science* 326:835-837.
- Le Roux, G, S.V. Hansson, S.V. y Claust. A. 2016. Inorganic Chemistry in the Mountain Critical Zone: Are the Mountain Water Towers of Contemporary Society Under Threat by Trace Contaminants?. In: *Mountain Ice and Water*, p: 131-148. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-444-63787-1.00003-2>
- Mata, M.P., Moreno, A., Oliva-Urcia, B., Valero-Garcés, B., Rico, M.T., 2013. Registro histórico de la contaminación atmosférica por Pb en el Lago de Marboré (PN de Ordesa y Monte Perdido). *Macla*.
- Miró, A., & Ventura, M. (2013). Historical use, fishing management and lake characteristics explain the presence of non-native trout in Pyrenean lakes: Implications for conservation. *Biological Conservation*, 167, 17-24.
- Parish, F., Sirin, A., Charman, D., Joosten, H., Minayeva, T., Silvius, M. and Stringer, L. (Eds.) 2008. *Assessment on Peatlands, Biodiversity and Climate Change: Main Report*. Global Environment Centre, Kuala Lumpur and Wetlands International, Wageningen. 206 p.
- Pla S. y Catalan J. (2005). Chrysophyte cysts from lake sediments reveal the submillennial winter/spring climate variability in the northwestern Mediterranean region throughout the Holocene. *Climate Dynamics*, 24: 263-278.
- Schneider, P. and S. J. Hook. 2010. Space observations of inland water bodies show rapid surface warming since 1985. *Geophys. Res. Lett.* 37:L22405.
- Sommaruga, R., B. Sattler, A. Oberleiter, A. Wille, S. Wögrath-Sommaruga, R. Psenner, M. Felip, L. Camarero, S. Pina, R. Gironés, and J. Catalan. 1999. An in situ enclosure experiment to test the solar UVB impact on plankton in a high-altitude mountain lake. II. Effects on the microbial food web. *Journal of Plankton Research* 21:859-876.
- Ventura, M., Camarero, L., Buchaca, T., Bartumeus, F., Livingstone, D. M. & Catalan, J. (2000). The main features of seasonal

variability in the external forcing and dynamics of a deep mountain lake (Redó, Pyrenees). *J.Limnol*, 59, 97-108.

2.6 Ciclo hidrológico y recursos hídricos.

- ACA - Agència Catalana de l'Aigua (2015), Pla de Gestió del Districte de Conca Fluvial de Catalunya 2016-2021. Barcelona: Generalitat de Catalunya.
- AEAG - Agence de l'eau Adour-Garonne, (2011), Changements climatiques et Eaux souterraines. Etat des connaissances sur le bassin Adour-Garonne, 122 p.
- Agarwal, A., Angeles, M.S.D., Bhatia, R., Chéret, I., Davila-Poblete, S., Falkenmark, M., Villarreal, F.G., Jønch-Clausen, T., Kadi, M.A., Kindler, J., Rees, J., Roberts, P., Rogers, P., Solanes, M., Wright, A., 2000. *Integrated Water Resources Management*. Technical Advisory Committee Background Papers, 4. Stockholm, Sweden, Global Water Partnership.
- Agarwal, A., Angeles, M.S.D., Bhatia, R., Chéret, I., Davila-Poblete, S., Falkenmark, M., Villarreal, F.G., Jønch-Clausen, T., Kadi, M.A., Kindler, J., Rees, J., Roberts, P., Rogers, P., Solanes, M., Wright, A., 2000. *Integrated Water Resources Management*. Technical Advisory Committee Background Papers, 4. Stockholm, Sweden, Global Water Partnership.
- Agència Catalana de l'Aigua (ACA). (2009) Aigua i canvi climàtic: Diagnosi dels impactes previstos a Catalunya. Barcelona, Generalitat de Catalunya.
- Barnett, T. P., J. C. Adam, and D. P. Lettenmaier (2005), Potential impacts of a warming climate on water availability in snow-dominated regions, *Nature*, 438(11), 303-309.
- Batalla, R. J.; Gomez, C. M.; Kondolf, G. M. (2004). Reservoir-induced hydrological changes in the Ebro River basin (Northeastern Spain). *Journal of Hydrology*, 290, p. 117-136.
- Beguería S., Campos P., Serrano R., Álvarez A. (2015) Producción, usos, renta y capital ambientales del agua en los sistemas forestales de Andalucía. En: *Biodiversidad, usos del agua forestal y recolección de setas silvestres en los sistemas forestales de Andalucía* (Campos P., Díaz M., eds). Memorias científicas de RECAMAN. Volumen 2. Memoria 2.2. Editorial CSIC, Madrid.
- Beguería S., Campos P., Serrano R., Álvarez A., 2015. Producción, usos, renta y capital ambientales del agua en los sistemas forestales de Andalucía. En: *Biodiversidad, usos del agua forestal y recolección de setas silvestres en los sistemas forestales de Andalucía* (Campos P., Díaz M., eds). Memorias científicas de RECAMAN. Volumen 2. Memoria 2.2. Editorial CSIC, Madrid.
- Beguería, S., López-Moreno, J. I., Lorente, A., Seeger, M., & García-Ruiz, J. M. (2003). Assessing the effect of climate oscillations and land-use changes on streamflow in the Central Spanish Pyrenees. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 32(4), 283-286.
- Berger, L., R. Speare, H. B. Hines, et al. 2004. Effect of Season and Temperature on Mortality in Amphibians due to Chytridiomycosis. *Australian Veterinary Journal* 82(7): 434-439.
- Blaustein, Andrew R., and Joseph M. Kiesecker. 2002. Complexity in Conservation: Lessons from the Global Decline of Amphibian Populations. *Ecology Letters* 5(4): 597-608.
- Blaustein, Andrew R., and Joseph M. Kiesecker (2002). Complexity in Conservation: Lessons from the Global Decline of Amphibian Populations. *Ecology Letters* 5(4): 597-608.
- Buendía, C., Batalla, R. J., Sabater, S., Palau, A., and Marcé, R. (2016) Runoff Trends Driven by Climate and Afforestation in a Pyrenean Basin. *Land Degrad. Develop.*, 27: 823-838. doi: 10.1002/ldr.2384.
- Buendía, C.; Bussi, G.; Tuset, J. [et al.] (2016). Effects of afforestation on runoff and sediment load in an upland Mediterranean catchment. *Science of the Total Environment*. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2015.07.005.
- Caballero, Y., S. Voirin-Morel, F. Habets, J. Noilhan, P. LeMoigne, A. Lehenaff, and A. Boone (2007), Hydrological sensitivity of the Adour-Garonne river basin to climate change, *Water Resour. Res.*, 43, W07448, doi:10.1029/2005WR004192.
- Candela, I.; tamoh, K.; Olivares, G. (2012). «Modelling impacts of climate change on water resources in ungauged and data-scarce watersheds. Application to the Siurana catchment (NE Spain)». *Science of the Total Environment*, 440, p. 253-260.
- Candela, L.; Tamoh, K.; Olivares, G. (2012). «Modelling impacts of climate change on water resources in ungauged and data-scarce watersheds. Application to the Siurana catchment (NE Spain). *Science of the Total Environment*, 440, p. 253-260.
- Clare, Frances C., Julia B. Halder, Olivia Daniel, et al. (2016). Climate Forcing of an Emerging Pathogenic Fungus across a Montane Multi-Host Community. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 371(1709): 20150454.
- Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE), 2015, The Ebro Water Management Plan. Zaragoza.
- CHE - Confederación Hidrográfica del Ebro (2005). Evaluación preliminar de la incidencia del cambio climático en los recursos hídricos de la cuenca del Ebro (Clave 2005-PH-22-I). Oficina de Planificación Hidrológica, Condeferación Hidrográfica del Ebro. Zaragoza.
- de Mendoza Barberà, Guillermo. Los macro-invertebrados lacustres y el gradiente altitudinal en los Pirineos, 2013. Tesis Doctoral, Universidad de Barcelona, Dept. de Ecología. <http://hdl.handle.net/2445/45523>.
- Dingman SL (2002) *Physical Hydrology*. 2nd ed. New Jersey, Prentice-Hall.
- Elsen, Paul R., and Morgan W. Tingley. 2015. Global Mountain Topography and the Fate of Montane Species under Climate Change. *Nature Climate Change* 5(8): 772-776.