



HAL
open science

El Impacto del CC en los sectores biofísicos

Blas Valero Garcés, Didier Galop, Lluís Camarero, Jordi Catalan, Ana Moreno, Fernando Barreiro-Lostres, Juan Ignacio López Moreno, José-Maria Garcia Ruiz, Graciela Gil Romera, Mario Morellón, et al.

► **To cite this version:**

Blas Valero Garcés, Didier Galop, Lluís Camarero, Jordi Catalan, Ana Moreno, et al.. El Impacto del CC en los sectores biofísicos. El cambio climático en los Pirineos: impactos, vulnerabilidades y adaptación El cambio climático en los Pirineos: impactos, vulnerabilidades y adaptación, OPCC-CTP, pp.18-23, 2018. hal-03185806

HAL Id: hal-03185806

<https://hal.science/hal-03185806>

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. El Impacto del CC en los sectores biofísicos

Coordinadores: Blas Valero-Garcés (IPE-CSIC)

Autores: Blas Valero-Garcés (IPE-CSIC), Didier Galop (EcoLab-CNRS), Lluís Camarero (CEAB-CSIC), Jordi Catalán (CREAF), Ana Moreno (IPE-CSIC), Fernando Barreiro-Lostres (IPE-CSIC), Juan Ignacio López (IPE-CSIC), José María García-Ruiz (IPE-CSIC), Graciela Gil-Romera (IPE-CSIC), Mario Morellón (Universidad de Cantabria), Penélope González-Sampériz (IPE-CSIC)

RESUMEN

Los cambios en el clima durante el Holoceno (últimos 11700 años) han tenido importantes impactos en el territorio pirenaico y sus sistemas biofísicos. Particularmente significativos han sido los cambios en la disponibilidad hídrica y en la cubierta vegetal, así como en la dinámica de la criosfera y los procesos superficiales de erosión y transporte de sedimentos. A escala milenaria, el Holoceno presenta una estructura tripartita con una fase inicial con progresivo desarrollo del bosque e intensificación de los procesos superficiales de erosión y transporte hasta hace unos 8000 años, seguida de una con el máximo desarrollo del bosque en el piso montano hasta hace unos 4500 años, descenso de los procesos erosivos y menor disponibilidad hídrica y finalmente una relativamente húmeda hasta la actualidad. El impacto en el territorio de las fases más cálidas y secas durante la Anomalía Climática Medieval (900-1300 CE) y más frías y húmedas de la Pequeña Edad del Hielo (1400-1850 CE) está fuertemente modulado por la actividad antrópica. Los cambios recientes muestran las sinergias entre el Calentamiento Global y la Gran Aceleración.

Durante el Holoceno (últimos 11700 años) se han producido importantes oscilaciones climáticas que han generado cambios de diferente intensidad y duración en la distribución de la vegetación, los procesos de erosión del suelo y generación de avenidas, la dinámica de los ecosistemas de montaña, los recursos hídricos e incluso de las actividades humanas en los Pirineos (García-Ruiz et al., 2015). En esta sección resumimos los principales impactos en la hidrosfera, criosfera, biosfera y en las sociedades humanas durante este periodo, basados en el estudio de depósitos glaciales, fluviales, lacustres y de espeleotemas.

2.1 El cambio climático durante el Holoceno

Paleohidrología

El aumento de la temperatura y de la humedad a escala global al comienzo del Holoceno se reflejó en un aumento de los niveles de los lagos en las zonas más elevadas de los Pirineos y con mayor influencia atlántica. Sin embargo, en las zonas a menor altitud, más sensibles a la sequía estival, el aumento de temperaturas y el máximo de insolación estival dieron lugar a una mayor evaporación y las condiciones áridas de la fase fría del *Younger Dryas* (12900- 11700 años BP²) se prolongaron e intensificaron, retrasando el incremento de la humedad durante dos milenios más, hasta hace unos 9500 años. A escala milenaria, la evolución paleohidrológica del Holoceno en los Pirineos presenta una estructura “tripartita” (González-Sampériz et al., 2017), con una fase húmeda inicial, seguida de una seca, y finalmente, una húmeda. En conjunto, el Holoceno temprano (11700-8000 años BP) constituye el periodo de mayor disponibilidad hídrica en todo el territorio pirenaico, con un descenso progresivo de la misma durante el Holoceno medio (a partir de 5500-4500 años BP), con condiciones particularmente secas en torno a 3000 – 2500 años antes del presente. Posteriormente, durante los últimos 2000 años, ha tenido lugar una cierta recuperación de los niveles de los lagos. Además de esta variabilidad a escala milenaria se han registrados también cambios hidrológicos más rápidos (a escala de siglos o menor), con aumentos en la escorrentía superficial atribuidos a eventos de precipitación intensa o alta fusión nival. En general, estos episodios se correlacionan con fases frías en el Atlántico Norte y en la Cuenca Mediterránea. Las dos últimas grandes oscilaciones climáticas (Anomalía Climática Medieval, ACM y Pequeña Edad de Hielo, PEH), registradas durante el último milenio, tuvieron una repercusión muy significativa en la hidrología de los Pirineos. La ACM (900- 1300 CE³) se caracterizó por un descenso generalizado del nivel de los lagos, con mayor evaporación y salinidad en los de zonas bajas y una gran variabilidad respecto a la intensidad de la escorrentía superficial. Por el contrario, durante la PEH (1300-1800 CE) se produjo un aumento generalizado en el nivel de los lagos, en el contexto de una fase de re- avance glaciario (Morellón et al., 2012). Esta sucesión de condiciones áridas y húmedas ACM-PEH durante el último milenio se ha relacionado con cambios en la Oscilación del Atlántico Norte (NAO por sus siglas en inglés), un mecanismo de variabilidad climática que provoca mayores precipitaciones de origen Atlántico en zonas septentrionales (fases de NAO+)

o meridionales de Europa (NAO-), como los Pirineos. Las reconstrucciones disponibles indican que durante la ACM predominaron condiciones de NAO+, con más precipitaciones en el Atlántico norte, mientras que durante la PEH predominaron las fases de NAO-, con mayor precipitación en los Pirineos. Si bien, debe tenerse en cuenta que el efecto local de la NAO sobre las condiciones de aridez en nuestras latitudes está sujeto a una importante variabilidad decadal (Vicente-Serrano y López-Moreno, 2008). El registro laminado del lago de Montcortés sugiere que el comienzo (1347-1400 CE) y final (1844- 1894 CE) de la PEH fueron periodos de precipitaciones más frecuentes e intensas (Corella et al., 2017).

Finalmente, durante el siglo XX y en el contexto del Calentamiento Global actual, existen evidencias de un descenso en la disponibilidad hídrica en los Pirineos, con niveles más bajos en los lagos a menor altura y con una menor frecuencia de eventos de precipitación intensa. Además, el caudal de los ríos pirenaicos ha disminuido en las últimas décadas, pero en este caso además de razones climáticas, el descenso debe ser atribuido al aumento de la superficie arbolada tras el abandono rural (Beguería et al., 2003; García-Ruiz et al., 2016).

Erosión y procesos superficiales

El estudio de sedimentos fluviales ha permitido reconstruir periodos de mayor intensidad de inundaciones en los ríos de la península ibérica (Benito et al., 2008). En las cuencas Atlánticas, las avenidas corresponden a intensas lluvias asociadas a frentes atlánticos controlados por la NAO. En las Mediterráneas, las precipitaciones extremas son inducidas por sistemas convectivos durante el otoño. El incremento de la torrencialidad registrado en lagos de altitud durante el Holoceno temprano (Basa de la Mora: Pérez-Sanz et al., 2013; Marboré: Oliva-Urcía et al., 2018) o en altitudes medias en periodos más recientes (Montcortés: Corella et al., 2016) está asociado a una mayor disponibilidad hídrica y marcada estacionalidad. En concreto, los sedimentos laminados del lago de Montcortés proporcionan el primer registro con resolución anual de eventos de precipitación intensa (>90 mm) durante los últimos 3000 años y muestran que en las zonas con influencia Mediterránea de los Pirineos, las lluvias torrenciales han sido más frecuentes durante periodos más cálidos (ACM) que durante los fríos (PEH). La

variabilidad hidroclimática más alta se registró durante la transición entre la Anomalía Climática Medieval (ACM) y la Pequeña Edad de Hielo (PEH) (siglo XIV). Durante algunas de las fases de la PEH con inviernos más secos y fríos, el caudal de los ríos habría disminuido y las avenidas fueron menos frecuentes y más irregulares en comparación con la ACM (900–1300 CE). Las tasas de denudación⁴ durante el Holoceno han cambiado en función de la intensidad de las precipitaciones, el tipo de cubierta vegetal y usos del suelo y la disponibilidad de sedimentos. A escala regional los aportes sedimentarios fluviales hacia el mar probablemente aumentaron durante los periodos de mayor actividad fluvial en el Holoceno temprano y tardío. El delta del Ebro experimentó un notable aumento durante el periodo romano, muy probablemente debido a una mayor actividad agrícola y minera en toda la cuenca, aumentando las fuentes de sedimentos. En las cuencas ibéricas, las mayores fases de agradación fluvial⁵ corresponden a la época medieval (1000 – 1500 CE), probablemente por un mayor impacto antrópico contemporáneo al final de la ACM y el comienzo de la PEH (1300–1400 CE) (Benito et al., 2008). La presencia de un nivel con restos de material carbonizado correspondiente a los siglos X-XI en el Lago de Tramacastilla (Valle del Gállego) refleja un momento de incendios generalizados provocados para ampliar el área ocupada por los pastos subalpinos aprovechados por los ganados trashumantes en verano (Montserrat, 1992). En la vertiente sur de los Pirineos, el siguiente periodo de intensa erosión ocurrió con el máximo demográfico a finales del siglo XIX y comienzos del XX, causado muy probablemente por una mayor intensidad en la explotación de los recursos en el medio rural (García-Ruiz et al., 2015) y favorecido por una mayor frecuencia e intensidad de avenidas durante las fases finales de la PEH (siglo XIX).

Los cambios más recientes en la intensidad de los procesos erosivos y el transporte de sedimentos por la red fluvial, están fuertemente determinados por los cambios en el uso del suelo acontecidos en las últimas décadas (abandono rural, reforestación). La tendencia de las últimas décadas hacia un mayor déficit hídrico y menos eventos extremos no es inusual en el contexto del Holoceno tardío en el Mediterráneo Occidental. Sin embargo, las series temporales más largas sugieren que la frecuencia de las lluvias torrenciales puede aumentar en un escenario de calentamiento global (Corella et al., 2016).

(2) Para las edades Before Present (BP) se considera el año 1950 como el “presente”.

(3) Las edades “Common Era” (CE) y “Before Common Era” sustituyen a la notación tradicional en arqueología de AD y BC.

(4) (5) La agradación es la acumulación de sedimentos en los ríos, arroyos o lagos. La denudación es la erosión de los suelos y sedimentos de las cuencas de recepción.

Evolución de la criosfera

Probablemente, la mayoría de los glaciares pirenaicos desaparecieron en los primeros milenios del Holoceno o quedaron restringidos a los circos más elevados (García-Ruiz *et al.*, 2014). Muchos de estos glaciares se expandieron durante el Neoglacial (hace unos 5000 años) y en varios circos se han documentado fluctuaciones posteriores como el retroceso glaciar durante la Edad del Bronce y el periodo húmedo romano y una corta expansión durante la Baja Edad Media entre los años 600 y 800 CE. Durante la PEH muchos glaciares pirenaicos avanzaron hasta alcanzar la máxima extensión de todo el Holoceno. A mediados del siglo XIX finalizó la PEH y los glaciares pirenaicos acusaron muy pronto el calentamiento posterior. Desde 1850 los glaciares han retrocedido de forma casi continuada, a pesar de que se han dado breves periodos de estabilización o incluso de cierta recuperación. La degradación de los glaciares ha sido particularmente acusada desde 1980. En siglo y medio han desaparecido muchos de ellos, otros han pasado a ser simples neveros y, finalmente, otros continúan dentro de la categoría de glaciares, pero han experimentado notables disminuciones en tamaño y espesor (Rico *et al.*, 2017). La evolución de algunos glaciares y del manto de nieve en el piso subalpino muestra que incluso en años con elevada innivación, los glaciares siguen retrocediendo (García-Ruiz *et al.*, 2015; López-Moreno *et al.*, 2016). Pequeños sectores con permafrost siguen presentes por encima de 2600 m s.n.m., donde se han identificado suelos poligonales y hasta un total de 13 glaciares rocosos están todavía en activo.

Cambios en la vegetación

El comienzo del Holoceno en las zonas de los Pirineos con mayor influencia Atlántica dio paso a un gran desarrollo del bosque en los pisos montano y subalpino. Las variaciones entre el desarrollo de coníferas y caducifolios en los primeros milenios revelan la rápida respuesta de la vegetación a las fluctuaciones climáticas. La marcada estacionalidad del clima durante este periodo y la elevada evaporación en verano provocó que en zonas de mayor influencia Mediterránea, el paisaje estépico perdurase hasta hace unos 9200 años. A partir de ese momento, un aumento de las temperaturas invernales y una mayor disponibilidad hídrica permitieron la expansión del bosque caducifolio dominado por robles y avellanos principalmente (González-Sampériz *et al.*, 2017). Durante el Holoceno Medio, hace unos 8200 - 6000 años, como respuesta a inviernos cálidos y condiciones más húmedas con una distribución de la precipitación más uniforme a lo largo del año, se desarrollaron en los Pirineos centrales y orientales un

bosque de tipo Mediterráneo, formado por *Quercus* semi-caducifolios en el piso montano y se favoreció la retirada de las coníferas y la expansión en altitud del bosque de caducifolios, el cual pudo establecerse en el piso subalpino (Leunda *et al.*, 2017). El periodo entre 6000 y 4800 años fue una fase de transición a nivel regional durante la cual la estacionalidad se acusó con una intensificación de la estación seca, particularmente notable a menor altitud. Precisamente en estas zonas, las comunidades más afectadas fueron las de caducifolios del piso alpino y subalpino donde se produjo una expansión de los pinos, enebros y sabinas. El establecimiento final de unas condiciones más áridas hace unos 4800 años causó la desaparición de importantes masas de árboles caducifolios en el piso montano y favoreció la expansión de *Quercus* semi-caducifolios (quejigos) y perennifolios (encinas) y la expansión de *Pinus* (pinos) a mayores altitudes. La vegetación se adaptó a condiciones especialmente áridas durante dos periodos: hace 2900 - 2400 años y durante la Anomalía Climática Medieval entre 900-1300 CE. En la Pequeña Edad de Hielo, y más concretamente, durante las fases más frías y húmedas, se produjeron cambios en la estructura y composición de los bosques, aunque la menor intensidad de las actividades humanas en montaña también influyó en dichos cambios. El límite superior del bosque experimentó un ligero descenso en las áreas en que se conservaba de forma natural (Camarero *et al.*, 2015).

Desde el final de la PEH, las actividades humanas y las modificaciones en los usos del suelo parecen ser el principal motor de cambio de la vegetación en los Pirineos. Sin embargo, durante las últimas décadas, el crecimiento del pino salgareño (*Pinus nigra*) por encima del límite del bosque en algunas zonas del Parque Nacional de Ordesa y Monte Perdido (PNOMP) sugiere un ascenso altitudinal de la vegetación que puede estar relacionado, por una parte con una menor presión antrópica pero, sobre todo, con temperaturas medias más altas en altura que permiten el desarrollo de la vegetación leñosa.

Incendios

Los incendios son perturbaciones que actúan como reguladores de los ecosistemas y a su vez están modulados por la dinámica interna de los mismos. En la vertiente sur de los Pirineos, a cotas entre los 1900 y 2200 m s.n.m, se dio una mayor frecuencia e intensidad de incendios al comienzo del Holoceno (entre 10500 y 7700 años BP) debido muy probablemente a la máxima insolación estival producida durante el Holoceno temprano, que habría favorecido una mayor aridez durante el verano, aumentando las probabilidades de incendios. Además, la expansión del bosque de



Figura 2.1.1 Resumen de los impactos en el territorio pirenaico asociados al cambio climático durante el Holoceno (últimos 11700 años). Escalas cualitativas de menor (0) a mayor. Fuente: elaboración propia

caducifolios, proporcionaría la biomasa necesaria para esta mayor frecuencia de incendios de origen natural en el *treeline* de los Pirineos centrales (Gil-Romera *et al.*, 2014). Durante el Holoceno Medio se redujo notablemente la frecuencia de incendios en la vertiente sur de los Pirineos, con una actividad del fuego moderada que podría haber estado vinculada a un manejo antrópico y a cambios en la composición del bosque. Sin embargo, en la vertiente norte la frecuencia de incendios fue mayor entre 8500 - 5500 cal yr BP, asociada a un clima más cálido y seco (Rius *et al.*, 2012). Desde el final de la Edad del Bronce y durante la Edad de Hierro y el periodo romano (esencialmente entre 2500-1800 años BP) se registró una creciente presencia humana en la montaña. Los incendios de origen humano aparecen sobre todo a partir de la Edad del Bronce, correlacionándose con cultivos nómadas, la metalurgia y el pastoreo, especialmente entre 2900 y 2650 años BP y entre 1850-1550 años BP. Desde entonces, el impacto humano sobre la vegetación y consecuentemente en la dinámica de los incendios fue sensiblemente mayor (Rius *et al.*, 2012; Gil-Romera *et al.*, 2014).

Cabe destacar que la variabilidad temporal en la actividad del fuego durante el Holoceno en la vertiente sur de los Pirineos puede estar relacionada con patrones espaciales locales de distribución del combustible y su capacidad para arder (flamabilidad) así como acciones antrópicas locales y no necesariamente regionales. A pesar de ello, sí se puede asumir que existe una diferencia altitudinal en la ocurrencia de incendios, siendo más frecuentes y antes en el tiempo en las zonas más bajas, donde el combustible y la continuidad de la cobertura vegetal no habrían sido limitantes y donde los usos humanos habrían permitido un mayor impacto.

Cambios Rápidos

Los registros paleoambientales y paleoclimáticos muestran que los ecosistemas pirenaicos y los procesos superficiales son muy sensibles a los cambios climáticos y han respondido rápidamente a las fluctuaciones del clima durante el Holoceno. Durante las fases de cambio climático rápido definidas a escala global (Mayewski *et al.*, 2004) la vegetación, la disponibilidad hídrica, la criosfera y los procesos superficiales se vieron afectados de manera rápida y su impacto en el territorio pirenaico está documentado en algunos registros como resumimos a continuación. Un evento de estas características sucedido hace 8200 años. Fue uno de los más intensos y de alcance global, provocando incluso un descenso de las temperaturas y un aumento de la aridez en latitudes intermedias como las de los Pirineos. En los Pirineos se registró cierto descenso en la proporción de caducifolios, más

sensibles que las coníferas al incremento de aridez y descenso de temperaturas, así como un claro descenso de la isoterma de 0°C, según el registro de un tipo de algas (crisofíceas) del Lago Redó (Pla y Catalán, 2011). Durante los últimos 2000 años, las rápidas transiciones en precipitaciones y temperatura durante la ACM y la PEH (Giralt *et al.*, 2017; Oliva *et al.*, 2018) se han visto reflejadas en el territorio pirenaico, demostrando la vulnerabilidad de los ecosistemas de montaña a los cambios climáticos rápidos.

Cambio Climático e Impacto Humano

Diferentes estudios muestran que durante los últimos siglos el impacto humano en la vegetación, la hidrología y la erosión en los Pirineos han sido tan intensos que no siempre es fácil separarlos de las respuestas al cambio climático. Las primeras evidencias del significativo impacto humano en el paisaje pirenaico ocurrieron durante el Neolítico, aunque algunos cambios en la vegetación pueden interpretarse como deforestación humana o repuesta a cambios climáticos (Galop *et al.*, 2013). Durante los últimos 2000 años la transformación del paisaje pirenaico ha sido intensa y continuada, y más marcada en las tierras bajas que en el piso subalpino, donde por razones evidentes la presión humana ha sido más estacional y ligada al pastoreo. Los primeros impactos claros de la actividad antrópica en altitudes bajas aparecieron hace unos 3100 años, a través de una primera fase de deforestación y la presencia de polen de cereal en España (Morellón *et al.*, 2008). Cambios en la composición de la vegetación en sitios a mayor altitud se han interpretado como respuestas a fluctuaciones climáticas o efectos de la deforestación humana (Pérez-Sanz *et al.*, 2013; Leunda *et al.*, 2017).

Desde la época medieval, son numerosas las evidencias de cambios en el paisaje debidos a deforestación y actividades humanas. Fue durante la Edad Media y coincidiendo con un periodo climático relativamente más cálido - la ACM - cuando se produjeron los grandes cambios en el paisaje de los Pirineos, con deforestación en los pisos subalpino y montano y aumento de los cultivos en las zonas bajas. Esta deforestación transformó profundamente el paisaje de la alta montaña pirenaica y, a la vez, cambió su funcionamiento hidrológico y los procesos geomorfológicos.

Durante la Pequeña Edad de Hielo disminuyó la presencia y actividades humanas en las zonas más altas debido a las condiciones frías en las cumbres pirenaicas. Sin embargo en las zonas de media montaña, el final de la PEH (mediados del siglo XIX) corresponde con el comienzo de la fase máxima ocupación humana

que se extendería hasta mediados del siglo XX. Desde entonces, el Calentamiento Global ha coincidido con el éxodo rural y el despoblamiento de la montaña.

ENCUADRE 2.1.1 LOS PIRINEOS DURANTE UN PERIODO CLIMÁTICO MÁS CÁLIDO: LA ANOMALÍA CLIMÁTICA MEDIEVAL

Durante la Baja Edad Media y coincidiendo con este periodo climático relativamente más cálido - la Anomalía Climática Medieval (ACM, 900 – 1300 CE) – se produjeron grandes cambios en el territorio de los Pirineos todavía observables en la actualidad. Una mayor presión humana en la montaña debido al aumento de la población fue paralela a una fase de temperaturas más altas y a una alta irregularidad hidrológica, caracterizada por una mayor estacionalidad y torrencialidad y una mayor presencia de fases áridas. En el piso subalpino, durante esta época se ha detectado el descenso de la superficie ocupada por los bosques de caducifolios y la mayor presencia de pinos, enebros y hierbas de carácter estépico como la ontina (*Artemisia*). En las tierras bajas, se produjo una expansión de los cultivos, especialmente cereales, olivos, viñas, castaños y nogales. Las praderas alpinas que caracterizan el paisaje actual de los Pirineos en la vertiente sur por encima de 1600 m s.n.m. experimentaron una notable expansión tras la deforestación del piso subalpino. Esta deforestación y cambios en el uso del suelo en los Pirineos, transformaron profundamente el paisaje de la alta montaña pirenaica y, a la vez, cambiaron su funcionamiento hidrológico y los procesos geomorfológicos asociados. ¿Puede servirnos la ACM como un análogo para la fase actual de Calentamiento Global? Aunque las primeras fases del calentamiento global en el siglo XX se correspondieron con un descenso de las actividades en la alta montaña debido al abandono rural, en la actualidad, el Cambio Global en los Pirineos está protagonizado por condiciones más cálidas e intensas transformaciones antrópicas. Aunque las causas de los cambios climáticos no son idénticas, ambos periodos comparten un aumento rápido de la temperatura, una mayor irregularidad hidrológica y una elevada presión antrópica.

2.2 Biodiversidad de montaña: fauna

Coordinadores: Juan Terrádez (CTP-OPCC), Idoia Arauzo (CTP-OPCC)
Autores: Juan Terrádez (CTP-OPCC), Idoia Arauzo (CTP-OPCC)
Coautores: José Antonio Atauri (Oficina Técnica EUROPARC-España), Josep María Ninot (UB, IRBio), Bernat Claramunt (CREAF, Universitat Autònoma de Barcelona) Sofia Morcelle (SEO/BirdLife), Ricardo García-González, (IPE- CSIC), Guillem Masó Ferrerons (IPE-CSIC).

2.2.1 Cambios en la productividad y abundancia de las especies

El cambio climático puede afectar a la fisiología de muchas especies, influyendo en su productividad y en definitiva en su supervivencia a largo plazo (Parmesan *et al.*, 2006). La correlación entre variables climáticas y parámetros demográficos de las especies de alta montaña ha sido ampliamente demostrada por la comunidad científica (Provenzale, 2008; Bionda y Brambilla, 2012; Garcia *et al.*, 2014; EEA, 2016; Pacifici *et al.*, 2015; De Pous., 2016). En los ecosistemas de la región biogeográfica alpina los impactos del cambio climático en la fisiología y productividad de algunas especies han resultado ser más evidentes que en otras regiones biogeográficas. En estos ambientes, el clima es el principal factor regulador del ecosistema y por lo tanto, las comunidades de animales y plantas se encuentran en un delicado estado de equilibrio con las variables climáticas.

Impactos observados y previstos

La reducción de la magnitud y persistencia de las nevadas registrada en las últimas décadas en los Pirineos está teniendo consecuencias en las diversas especies que habitan ambientes nivosos. Este es el caso de los grandes mamíferos de altitud como el rebeco pirenaico o sarrio (*Rupicapra pyrenaica*). Varios estudios han mostrado la correlación entre los cambios demográficos en la población pirenaica de este ungulado y los años con una cubierta de nieve inferior a un cierto umbral (Jacobson *et al.*, 2004; Willis *et al.*, 2013; Kourkgy *et al.*, 2015). En particular, se ha demostrado que los cambios fenológicos en las especies vegetales de las que se alimentan los sarrios, actúan como señal para el inicio de etapas importantes en su ciclo de vida como la reproducción, la concepción o la duración de la gestación. Análogamente, también se ha observado que algunas especies de aves características de los ambientes de cotas altas como la perdiz nival (*Lagopus muta pyrenaica*) están

RESUMEN

Las condiciones climáticas juegan un rol decisivo en la composición, estructura y funcionamiento de los sistemas naturales. Los ecosistemas de alta montaña, caracterizados por una alta riqueza de especies endémicas con estrechos rangos de distribución, tamaños de poblaciones efectivos bajos, requisitos específicos de hábitat y capacidades limitadas de dispersión, son particularmente vulnerables a las variaciones de las condiciones climáticas. De hecho, en la montaña el clima es uno de los principales reguladores del funcionamiento de los ecosistemas, ya que incluso pequeñas variaciones en las temperaturas pueden incidir en la distribución y abundancia de muchas especies. Los impactos del cambio climático en la fauna de los Pirineos pueden manifestarse de diferente manera, incluyendo i. cambios generales en la fisiología de algunas especies (por ejemplo, adaptaciones fisiológicas a través de procesos microevolutivos), ii. alteraciones en la fenología de las especies (como por ejemplo variaciones en el número de eventos reproductivos, en la fecha de eclosión de los huevos o en la fecha de inicio y fin de los movimientos migratorios), iii. variaciones en la abundancia, composición y distribución geográfica de las poblaciones (que se manifiestan a través de cambios latitudinales y altitudinales del rango de distribución de las distintas especies) y que, junto con las alteraciones fenológicas, pueden desembocar en iv. alteraciones ecológicas más profundas a través de desajustes entre los ciclos biológicos de especies interconectadas entre sí (como por ejemplo los sistemas depredador-presa o planta -herbívoro), capaces de alterar el funcionamiento del conjunto del ecosistema. Además, el cambio climático podría incrementar el v. riesgo de invasión y/o expansión de algunas especies exóticas, favoreciendo su transporte y posterior asentamiento, gracias a las nuevas condiciones climáticas favorables y a la reducción de la competencia interespecífica con las especies nativas. Por otro lado, no hay que olvidar que actuando en sinergia con los impactos climáticos directos existen varios factores, en su mayoría de naturaleza antrópica, cuya magnitud los convierte en un desafío todavía mayor para la conservación de la fauna pirenaica. Entre ellos, es importante mencionar la destrucción y fragmentación del hábitat, los cambios en los usos del suelo, la sobreexplotación de los recursos hídricos, la contaminación atmosférica y de las aguas, el abandono de las actividades agropastorales y la introducción y difusión de especies exóticas. La acción combinada de los impactos antrópicos y los impactos del cambio climático, a través de las alteraciones mencionadas, pueden ocasionar la modificación de algunos procesos ecológicos clave en los ecosistemas de alta montaña, lo que podría comprometer su propia pervivencia, limitando además su capacidad para proveer bienes y servicios a la sociedad.

- Vicente-Serrano, S.M.; López-Moreno, J. y Beguería, S. 2007. La precipitación en el Pirineo español: diversidad espacial en las tendencias y escenarios futuros. *Pirineos*, 162: 43-69.

2 El Impacto del CC en los sectores biofísicos

2.1 El cambio climático durante el Holoceno

- 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* 32: 283-286.
- Benito, G., Thorndyraft, V.R., Rico, M., Sánchez-Moya, Y., Sopena, A., 2008. Palaeoflood and floodplain records from Spain: evidence for long-term climate variability and environmental changes. *Geomorphology* 101, 68-77.
- Camarero, J.J., García-Ruiz, J.M., Sangüesa-Barreda, G., Galván, J.D., Alla, A.Q., Sanjuán, Y., Beguería, S., Gutiérrez, E. Arctic, Antarctic, and Alpine Research 47 (4): 773-783.
- Corella J.P. B.L. Valero-Garcés, F. Wang, A. Martínez-Cortizas, C.A. Cuevas, A. Saiz-Lopez., 2017. 7 00 years reconstruction of mercury and lead atmospheric deposition in the Pyrenees (NE Spain) *Atmospheric Environment* 155: 97-107
- Corella, J.P., Stefanova, V., El Anjoumi, A., Rico, E., Giral, S., Moreno, A., Plata-Montero, A., Valero-Garcés, B.L., 2013. A 2500-year multi-proxy reconstruction of climate change and human activities in northern Spain: The Lake Arreo record. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 386, 555-568.
- Corella, J.P., Valero-Garcés, B.L., Vicente-Serrano, S.M., Brauer, A., Benito, G., 2016. Three millennia of heavy rainfalls in Western Mediterranean: frequency, seasonality and atmospheric drivers. *Scientific Reports* 6, 38206; doi: 10.1038/srep38206
- Galop, D., Rius D., Cugny, C. & Mazier, F. 2013. A history of long-term Human – Environment interactions in the French Pyrenees inferred from pollen data. In Lozny L.R. (ed). *Continuity and Change in cultural adaptation to mountain environments. Studies in Human Ecology and Adaptation* 7. Springer, p : 19-30.
- Gil-Romera G., González-Sampériz P. Lasheras-Álvarez L., Miguel Sevilla-Callejo M., Moreno A. Valero-Garcés B., López-Merino, L., Carrión, J., Pérez Sanz A., Aranbarri J., García-Prieto Fonce, E. 2014. Biomass-modulated fire dynamics during the last glacial-interglacial transition at the Central Pyrenees (Spain). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 402 : 113 - 124
- García-Ruiz, J.M., López-Moreno, J.I., Lasanta, T., Vicente-Serrano, S.M., González-Sampériz, P., Valero-Garcés, B.L., 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, e012. doi: <http://dx.doi.org/10.3989/Pirineos.2015>.
- 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 Spanish Pyrenees. *The Holocene* 24: 1439-1452.
- García-Ruiz, J.M.; Palacios, D.; González-Sampériz, P.; de Andrés, N.; Moreno, A.; Valero-Garcés, B.; Gómez-Villar, A. 2016. Mountain glacier evolution in the Iberian Peninsula during the Younger Dryas. *Quaternary Science Reviews*, 138: 16-30
- Giral, S., Moreno, A., Cacho, I. & Valero-Garcés, B.L. 2017. A comprehensive overview of the last 2,000 years Iberian Peninsula climate history, *CLIVAR Exchanges* No. 73, 5-10
- González-Sampériz, P.; Aranbarri, J.; Pérez-Sanz, A.; Gil-Romera, G.; Moreno, A.; Leunda, M.; Sevilla-Callejo, M.; Corella, J.P.; Morellón, M.; Oliva, B.; Valero-Garcés, B. 2017. Environmental and climate change in the southern Central Pyrenees since the Last Glacial Maximum: A view from the lake records. *Catena* 149 : 668-688.
- Leunda, M., González-Sampériz, P.; Gil-Romera, G.; Aranbarri, J.; Moreno, A.; Oliva-Urcia, B.; Sevilla, M.; Valero-Garcés, B.L. 2017. The Late-Glacial and Holocene Marboré Lake sequence (2612 m a.s.l., Central Pyrenees, Spain): Testing high altitude sites sensitivity to millennial scale vegetation and climate variability. *Global and Planetary Change* 157: 214-231 (<http://dx.doi.org/10.1016/j.gloplacha.2017.08.008>)
- López-Moreno, J. I., Revuelto, J., Rico, I., Chueca-Cía, J., Julián, A., Serreta, A., Serrano, E., Vicente-Serrano, S. M., Azorín-Molina, C., Alonso-González, E., and García-Ruiz, J.M., 2016 : Thining of the Monte Perdido Glacier in the Spanish Pyrenees since 1981. *The Cryosphere* 10, 681-694.
- Mayewski PA, Rohling EE, Stager JC et al. 2004. Holocene climate variability. *Quaternary Research* 62: 243-255.
- Montserrat, J. 1992. Evolución glacial y postglacial del clima y la vegetación en la vertiente sur del Pirineo: Estudio palinológico. Instituto Pirenaico de Ecología, Zaragoza, 147 pp.
- Morellón, M., Pérez-Sanz, A., Corella, J.P., Büntgen, U., Catalán, J., González-Sampériz, P., González-Trueba, J.J., López-Sáez, J.A., Moreno, A., Pla-Rabes, S., Saz-Sánchez, M.Á., Scussolini, P., Serrano, E., Steinhilber, F., Stefanova, V., Vegas-Vilarrúbia, T., Valero-Garcés, B., 2012. A multi-proxy perspective on millennium-long climate variability in the Southern Pyrenees. *Clim. Past* 8, 683-700.
- Morellón, M. Valero-Garcés, B., Vegas-Villarubia, T., González-Sampériz, P., Romero, O., Delgado-Huertas, A., Mata, P., Moreno, A., Rico, Maybe, Corella, J.P. 2009. Lateglacial and Holocene palaeohydrology in the western Mediterranean region: The Lake Estanya record (NE Spain). *Quaternary Science Review*, 28 : 2582-2599

- Oliva-Urcia, B; Leunda, M., Moreno, A.; Valero-Garcés, B.,González-Sampériz, P., Gil-Romera, G., Mata, M. P., HORDA Group. 2018. Last deglaciation and Holocene environmental change at high altitude in the Pyrenees: the geochemical and paleomagnetic record from Marboré Lake (N Spain). *Journal of Paleolimnology* <https://doi.org/10.1007/s10933-017-0013-9>
- Oliva, M., J. Ruiz-Fernández, M. Barriendos, G. Benito, J.M. Cuadrat, F. Domínguez-Castro, J.M. García-Ruiz, S. Giral, A. Gómez-Ortiz, A. Hernández, O. López-Costas, J.I. López-Moreno, J.A. López-Sáez, A. Martínez-Cortizas, A. Moreno, M. Prohom, M.A. Saz, E. Serrano, E. Tejedor, R. Trigo, B. Valero-Garcés, S.M. Vicente-Serrano. 2018. The Little Ice Age in Iberian mountains. *Earth-Science Reviews* 177: 175-208
- Pérez-Sanz, A., P. González-Sampériz, A. Moreno, B. Valero-Garcés, G. Gil-Romera, M. Rieradevall, P. Tarrats, L. Lasheras-Álvarez, M. Morellón, A. Belmonte, C. Sancho, M. Sevilla-Callejo, A. Navas. 2013. Holocene climate variability, vegetation dynamics and fire regimen in the Central Pyrenees: the Basa de la Mora sequence (NE Spain). *Quaternary Science Reviews* 73: 149-179
- Pla, S., Catalan, J., 2011. Deciphering chrysophyte responses to climate seasonality. *J Paleolimnol* 46, 139-150.
- Rius, D., Vannière, B. and Galop, D. 2012. Holocene history of fire, vegetation and land use from the central Pyrenees (France). *Quaternary Research* 77: 54-64
- Vicente-Serrano S.M. y Juan I. López-Moreno 2008: The nonstationary influence of the North Atlantic Oscillation on European precipitation. *Journal of Geophysical Research-Atmosphere*. 113, D20120, doi:10.1029/2008JD010382.
- **Biodiversidad de montaña: fauna.**
- Alexander, Jake & Chalmandrier, Loïc & Lenoir, Jonathan & Burgess, Treena & Essl, Franz & Haider, Sylvia & Kueffer, Christoph & Mcdougall, Keith & Milbau, Ann & Nuñez, Martín & Pauchard, Anibal & Rabitsch, Wolfgang & Rew, Lisa & Sanders, Nathan & Pellissier, Loïc. (2017). Lags in the response of mountain plant communities to climate change. *Global Change Biology*. 24.10.1111/gcb.13976.
- Araújo, M. B., Alagador, D., Cabeza, M., Nogués-Bravo, D., & Thuiller, W. (2011). Climate change threatens European conservation areas. *Ecology letters*, 14(5), 484-492.
- Barrett, R. T. (2014). Has climate change resulted in a mismatch between the spring arrival of the Common Cuckoo *Cuculus canorus* and its hosts in North Norway?.
- Benadi, G., Hovestadt, T., Poethke, H. J., & Blüthgen, N. (2014). Specialization and phenological synchrony of plant-pollinator interactions along an altitudinal gradient. *Journal of Animal Ecology*, 83(3), 639-650.
- Bichet, C., Ferrandiz-Rovira, M., Claramunt, B., Figueroa, I. et al. Multiple geographic origins and high genetic differentiation of the Alpine marmots reintroduced in the Pyrenees. (2016) *Conservation Genetics*. DOI: 10.1007/s10592-016-0851-4
- Briedis, M., Beran, V., Hahn, S., & Adamík, P. (2016). Annual cycle and migration strategies of a habitat specialist, the Tawny Pipit *Anthus campestris*, revealed by geolocators. *Journal of Ornithology*, 157(2), 619-626.
- Buisan, S. T., Saz, M. A., & López-Moreno, J. I. (2015). Spatial and temporal variability of winter snow and precipitation days in the western and central Spanish Pyrenees. *International Journal of Climatology*, 35(2), 259-274.
- Capdevila-Argüelles L., B. Zilletti y V.A. Suárez Álvarez (2011). Cambio climático y especies exóticas invasoras en España. Diagnóstico preliminar y bases de conocimiento sobre impacto y vulnerabilidad. Documento de síntesis. Oficina Española de Cambio Climático, Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. Madrid, 17 pág.
- Caruso, N. M., Sears, M. W., Adams, D. C., & Lips, K. R. (2014). Widespread rapid reductions in body size of adult salamanders in response to climate change. *Global Change Biology*, 20(6), 1751-1759.
- Catalan, J., Ninot, J. M., & Aniz, M. M. (2017). The High Mountain Conservation in a Changing World. In *High Mountain Conservation in a Changing World* (pp. 3-36). Springer, Cham.
- Charmantier, A., & Gienapp, P. (2014). Climate change and timing of avian breeding and migration: evolutionary versus plastic changes. *Evolutionary Applications*, 7(1), 15-28.
- Cubas, J., Martín-Esquível, J. L., Nogales, M., Irl, S. D., Hernández-Hernández, R., López-Darias, M., ... & González-Mancebo, J. M. (2017). Contrasting effects of invasive rabbits on endemic plants driving vegetation change in a subtropical alpine insular environment. *Biological Invasions*, 1-15.
- Dastansara, N., Vaissi, S., Mosavi, J., & Sharifi, M. (2017). Impacts of temperature on growth, development and survival of larval Bufo (Pseudepidalea) viridis (Amphibia: Anura): implications of climate change. *Zoology and Ecology*, 1-7.
- de Pous, P., Montori, A., Amat, F., & Sanuy, D. (2016). Range contraction and loss of genetic variation of the Pyrenean endemic newt *Calotriton asper* due to climate change. *Regional environmental change*, 16(4), 995-1009.
- Flousek, J., Telenský, T., Hanzelka, J., & Reif, J. (2015). Population trends of Central European montane birds provide evidence for adverse impacts of climate change on high-altitude species. *PLoS one*, 10(10), e0139465.
- García-González, R., Aldezabal, A., Laskurain, N. A., Margalida, A., & Novoa, C. (2016). Factors affecting diet variation in the Pyrenean rock ptarmigan (*Lagopus muta pyrenaica*): Conservation implications. *PLoS one*, 11(2), e0148614.
- García, R. A., Cabeza, M., Rahbek, C., & Araújo, M. B. (2014). Multiple dimensions of climate change and their implications for biodiversity. *Science*, 344(6183), 1247579.
- Green, D. M. (2017). Amphibian breeding phenology trends under climate change: Predicting the past to forecast the future. *Global change biology*, 23(2), 646-656.

- Gordo, O., & Sanz, J. J. (2005). Phenology and climate change: a long-term study in a Mediterranean locality. *Oecologia*, 146(3), 484-495.
- Herrera, J. M., Ploquin, E. F., Rodríguez-Pérez, J., & Obeso, J. R. (2014). Determining habitat suitability for bumblebees in a mountain system: a baseline approach for testing the impact of climate change on the occurrence and abundance of species. *Journal of Biogeography*, 41(4), 700-712.
- Kolářová, E., Matiu, M., Menzel, A., Nekovář, J., Lumpe, P., & Adamík, P. (2017). Changes in spring arrival dates and temperature sensitivity of migratory birds over two centuries. *International journal of biometeorology*, 61(7), 1279-1289.
- Kourkgy, C., Garel, M., Appolinaire, J., Loison, A., & Toïgo, C. (2016). Onset of autumn shapes the timing of birth in Pyrenean chamois more than onset of spring. *Journal of Animal Ecology*, 85(2), 581-590.
- McCarty, J. P., Wolfenbarger, L. L., & Wilson, J. A. (2017). Biological impacts of climate change. eLS.
- Martínez-Freiria, F. (2015). Assessing climate change vulnerability for the Iberian viper *Vipera seonei*. *Basic and Applied Herpetology*, 29, 61-80.
- Miller-Struttman, N. E., Geib, J. C., Franklin, J. D., Kevan, P. G., Holdo, R. M., Ebert-May, D., ... & Galen, C. (2015). Functional mismatch in a bumble bee pollination mutualism under climate change. *Science*, 349(6255), 1541-1544.
- Møller, A.P., Rubolini, D., & Lehikoinen, E. (2008). Populations of migratory birds that did not show a phenological response to climate change are declining. *Proc. Natl Acad. Sci. USA* 105: 16195-16200.
- Morán-Tejeda, E., López-Moreno, J. I., & Sanmiguel-Valladolid, A. (2017). Changes in climate, snow and water resources in the Spanish Pyrenees: observations and projections in a warming climate. In *High Mountain Conservation in a Changing World* (pp. 305-323). Springer, Cham.
- Morueta-Holme, N., Fløjgaard, C., & Svenning, J. C. (2010). Climate change risks and conservation implications for a threatened small-range mammal species. *PloS one*, 5(4), e10360.
- Novoa, C., Astruc, G., Desmet, J. F., & Besnard, A. (2016). No short-term effects of climate change on the breeding of Rock Ptarmigan in the French Alps and Pyrenees. *Journal of Ornithology*, 157(3), 797-810.
- Ornosa, C., Torres, F., & De la Rua, P. (2017). Updated list of bumblebees (Hymenoptera: Apidae) from the Spanish Pyrenees with notes on their decline and conservation status. *Zootaxa*, 4237(1), 41-77.
- Pacifici, M., Foden, W. B., Visconti, P., Watson, J. E., Butchart, S. H., Kovacs, K. M., ... & Corlett, R. T. (2015). Assessing species vulnerability to climate change. *Nature Climate Change*, 5(3), 215.
- Palomo, I. (2017). Climate change impacts on ecosystem services in high mountain areas: A literature review. *Mountain Research and Development*, 37(2), 179-187.
- Panuccio, M., Martín, B., Morganti, M., Onrubia, A., & Ferrer, M. (2017). Long-term changes in autumn migration dates at the Strait of Gibraltar reflect population trends of soaring birds. *Ibis*, 159(1), 55-65.
- Parmesan, C. (2006) Ecological and evolutionary responses to recent climate change. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics* 37: 637-669. doi: 10.1146/annurev.ecolsys.37.091305.110100
- Pauchard, A., Milbau, A., Albiñ, A., Alexander, J., Burgess, T., Daehler, C., ... & Haider, S. (2016). Non-native and native organisms moving into high elevation and high latitude ecosystems in an era of climate change: new challenges for ecology and conservation. *Biological Invasions*, 18(2), 345-353.
- Petitpierre, B., McDougall, K., Seipel, T., Broennimann, O., Guisan, A., & Kueffer, C. (2016). Will climate change increase the risk of plant invasions into mountains?. *Ecological Applications*, 26(2), 530-544.
- Phillimore, A.B., Hadfield, J.D., Jones, O.R., Smithers, R.J. (2010). Differences in spawning date between populations of common frog reveal local adaptation. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 107, 8292-8297.
- Piracés, V. J., López-Flores, R., & Pérez-Collazos, E. (2015). Estudio poblacional y biométrico del tritón pirenaico en el Parque Nacional de Ordesa y Monte Perdido. *Lucas Mallada. Revista de Ciencias*, (17), 177-195.
- Pound, J.A., Bustamante, M.R., Coloma, L.A., Consuegra, J.A., Fogden, M.P.L., Foster, P.N., La Marca, E., Masters, K.L., Merino-Viteri, A., Puschendorf, R., Ron, S.R., Sanchez-Azofeifa, G.A., Still, C.J., Young, B.E. (2006). Widespread amphibian extinctions from epidemic disease driven by global warming. *Nature*, 439, 161-167.
- Prodon, R., Geniez, P., Cheylan, M., Devers, F., Chuine, I., & Besnard, A. (2017). A reversal of the shift towards earlier spring phenology in several Mediterranean reptiles and amphibians during the 1998-2013 warming slowdown. *Global change biology*.
- Pysek, P., Genovesi, P., Pergl, J., Monaco, A., & Wild, J. (2013). Plant invasions of protected areas in Europe: An old continent facing new problems. In L. C.
- Rasmont, P., Franzén, M., Lecocq, T., Harpke, A., Roberts, S. P., Biesmeijer, J. C., ... & Gonseth, Y. (2015). Climatic risk and distribution atlas of European bumblebees (pp. 236-p). Sofia: Pensoft.
- Romo, H., García-Barros, E., Márquez, A. L., Moreno, J. C., & Real, R. (2014). Effects of climate change on the distribution of ecologically interacting species: butterflies and their main food plants in Spain. *Ecography*, 37(11), 1063-1072.
- Rousselet, J., Zhao, R., Argal, D., Simonato, M., Battisti, A., Roques, A., & Kerdelhué, C. (2010). The role of topography in structuring the demographic history of the pine processionary moth, *Thaumetopoea pityocampa* (Lepidoptera: Notodontidae).

- Journal of biogeography, 37(8), 1478-1490
- Sánchez-Fernández, D., Rizzo, V., Cieslak, A., Faille, A., Fresneda, J., & Ribera, I. (2016). Thermal niche estimators and the capability of poor dispersal species to cope with climate change. *Scientific reports*, 6, 23381.
- Schmitt, T., Habel, J. C., Rödder, D., & Louy, D. (2014). Effects of recent and past climatic shifts on the genetic structure of the high mountain Yellow-spotted ringlet butterfly *Erebia manto* (Lepidoptera, Satyrinae): a conservation problem. *Global change biology*, 20(7), 2045-2061.
- Schweiger, O., Settele, J., Kudrna, O., Klotz, S., & Kühn, I. (2008). Climate change can cause spatial mismatch of trophically interacting species. *Ecology*, 89(12), 3472-3479.
- Settele, J., Kudrna, O., Harpke, A., Kühn, I., Van Swaay, C., Verovnik, R., ... & Kühn, E. (2008). Climatic risk atlas of European butterflies (p. 710). Sofia-Moscow: Pensoft.
- Singer, M. C., & Parmesan, C. (2010). Phenological asynchrony between herbivorous insects and their hosts: signal of climate change or pre-existing adaptive strategy?. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, 365(1555), 3161-3176.
- Thuiller W, Albert C, Araujo MB, Berry PM, Cabeza M, Guisan A, Hickler T, Midgley GF, Paterson J, Schurr FM, Sykes MT, Zimmermann NE (2008) Predicting global change impacts on plant species' distributions: future challenges. *Perspect Plant Ecol Evol Syst* 9:137-152. doi:10.1016/j.ppees.2007.09.004
- Thuiller W, Lavergne S, Roquet C, Boulangeat I, Lafourcade B, Araujo MB (2011) Consequences of climate change on the tree of life in Europe. *Nature* 470:531-534. doi:10.1038/nature09705
- Toïgo, M., Barraquand, F., Barnagaud, J. Y., Piou, D., & Jactel, H. (2017). Geographical variation in climatic drivers of the pine processionary moth population dynamics. *Forest Ecology and Management*, 404, 141-155.
- Vitasse, Y., Signarbieux, C., & Fu, Y. H. (2018). Global warming leads to more uniform spring phenology across elevations. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(5), 1004-1008.
- Walther, G. R. (2010). Community and ecosystem responses to recent climate change. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 365(1549), 2019-2024.
- Willisch, C. S., Bieri, K., Struch, M., Franceschina, R., Schnidrig-Petrig, R., & Ingold, P. (2013). Climate effects on demographic parameters in an un hunted population of Alpine chamois (*Rupicapra rupicapra*). *Journal of mammalogy*, 94(1), 173-182.
- Wilson, R. J., Gutiérrez, D., Gutiérrez, J., Martínez, D., Agudo, R., & Monserrat, V. J. (2005). Changes to the elevational limits and extent of species ranges associated with climate change. *Ecology Letters*, 8(11), 1138-1146.

2.3 Biodiversidad de montaña: flora

- Adler P.B. et al., 2011. Productivity is a poor predictor of plant species richness. *Science* 333, 1750-1753.
- Araújo M.B. et al., 2011. Climate change threatens European conservation areas. *Ecology Letters* 14, 484- 492.
- Baudière A. & Gauquelin T., 2005. Évolution actuelle de la végétation des milieux supraforestiers oriento-pyrénéens. *Bull. Soc. Hist. Nat. Toulouse*, 141-2 :5-14.
- Baron J.S. et al., 2009. Options for national parks and reserves for adapting to climate change. *Environmental Management* 44, 1033-1042.
- Beniston M. et al., 1996. The Impacts of Climate Change on Mountain Regions. In *Contribution of Working Group II to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Chapter 5, Cambridge University Press, 191-213.
- Bergamini A. et al., 2009. An elevational shift of cryophilous bryophytes in the last century – an effect of climate war-ming? *Diversity and Distributions* 15, 871-879.
- Bodin J. et al., 2013. Shifts of forest species along an elevational gradient in Southeast France: climate change or stand maturation? *Journal of vegetation science*, 24 (2), 269-283
- Bodin J., 2010. Observed changes in mountain vegetation of the Alps during the XXth century: role of climate and land-use changes. Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré (Nancy 1), Vandoeuvre-lès-Nancy, FRA, Gottfried Wilhelm Leibniz University of Hanover, DEU. 210 p.
- Bonhote J. & Vernet J.L., 1988. La « mémoire des charbonnières”. Essai de reconstitution des milieux forestiers dans une vallée marquée par la métallurgie (Aston, Haute-Ariège). *Revue forestière française*, 40 (3) :197-212.
- Braun-Blanquet, 1948. La végétation alpine des Pyrénées orientales. Etude de phytosociologie comparée, Ed. Instituto español de edafología, ecología y fisiología vegetal, Barcelona. 306 p.
- Brooker R.W., 2006. Plant-plant interactions and environmental change. *New Phytologist* 171, 271-284.
- Callaway R.M. et al., 2002. Positive interactions among alpine plants increase with stress. *Nature* 417, 844- 848.
- Colwell R.K. et al., 2008. Global warming, elevational range shifts, and lowland biotic attrition in the wet tropics. *Science* 322, 258-261.
- Corriol G. & Mikolajczak A., 2014. Contribution au Prodrome des végétations de France : les Salicetea herbaceae Braun-Blanq.